



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Erick Sousa Carneiro

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO,
BASEADA EM NURBS, PARA DETERMINAÇÃO DO ERRO DE
ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS USANDO
MMCs.**

João Pessoa - PB

Abril de 2019

Erick Sousa Carneiro

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO, BASEADA EM
NURBS, PARA DETERMINAÇÃO DO ERRO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
DE DENTES RETOS USANDO MMCS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à banca examinadora do Departamento de En-
genharia Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba como parte das exigências à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. José Carlos de Lima Junior

João Pessoa - PB

Abril de 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C289d Carneiro, Erick Sousa.

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO, BASEADA EM NURBS, PARA DETERMINAÇÃO DO ERRO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS USANDO MMCs. / Erick Sousa Carneiro. - João Pessoa, 2019.
71f. : il.

Orientação: José Carlos de Lima Júnior Lima Júnior.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs). 2. NURBS. 3. Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos. I. Lima Júnior, José Carlos de Lima Júnior. II. Título.

UFPB/BC

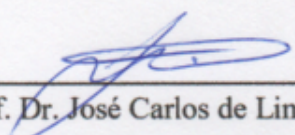
Erick Sousa Carneiro

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO,
BASEADA EM NURBS, PARA DETERMINAÇÃO DO ERRO DE
ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS USANDO MMCs.**

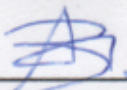
Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, tendo obtido o conceito APROVADO, conforme a apreciação da banca examinadora:

Aprovado em: 08 de maio de 2019.

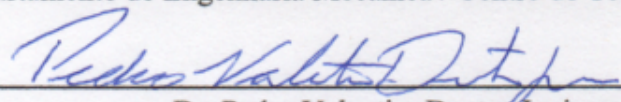
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior
Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB



Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva
Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB



Dr. Pedro Valentim Dantas Junior
Examinador Externo / Centro de Tecnologia / UFPB

*Dedico este trabalho aos meus pais Josenildo Vieira Carneiro e Maria Lúcia de Sousa Carneiro,
e à memória do meu avô Francisco Fernandes Carneiro.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível.

Aos meus pais Josenildo Vieira Carneiro e Maria Lúcia de Sousa Carneiro pelo suporte, incentivo e amor incondicional em toda minha vida.

Ao meu irmão Ewerton Sousa Carneiro por todos esses anos compartilhados e apoio em todos os momentos que foram de extrema importância.

A minha namorada Danyele Aires da Silva, pelo apoio, compreensão, carinho e paciência durante todos esses anos e durante a fase de desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus avôs e avós Odília Vieira Carneiro, Francisco Fernandes Carneiro [*in memoriam*] e Clotilde Santana de Sousa, pelos ensinamentos e orações. Aos meus tios Francinildo Vieira Carneiro, Ivanildo Vieira Carneiro, Francisco Fernandes Carneiro Filho e Sebastião Francisco de Souza, por todo incentivo e apoio desde sempre. De maneira geral a todos os meus familiares que colaboraram para o término desse trabalho.

Ao meu amigo desde a infância Paulo Villar, pela contribuição na elaboração no *software* computacional utilizado neste trabalho. Aos amigos desde o ensino médio Filipe e Adilson, que sempre me apoiaram em todos os momentos. Aos amigos Laís, Anderson e os demais do curso de Engenharia Mecânica por toda ajuda que me deram e por todos esses anos compartilhados.

Ao Professor orientador José Carlos de Lima Junior, pela sua orientação, paciência, força, sugestão e ensinamentos durante todo este período de trabalho.

Ao professor e amigo Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega, por toda contribuição, esforço dispensado e dedicação neste trabalho.

Aos amigos e professores que integram o Laboratório de Engenharia de Precisão, da Universidade Federal da Paraíba, em especial ao Professor João Bosco de Aquino Silva e Fideles, por disponibilizar seu tempo para realizar as medições na Máquina de Medição por Coordenadas.

A todos os professores que contribuíram com todo conhecimento e experiência adquirida até hoje.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

*“Quando tudo parecer dar errado em sua vida, lembre-se
que o avião decola contra o vento, e não a favor dele.”*
(Henry Ford)

RESUMO

Nos dias atuais, cresce cada vez mais a demanda de produtos com alta exatidão dimensional e geométrica, exigindo tolerâncias cada vez mais estreitas nas mais diversas áreas, principalmente nas indústrias. As engrenagens têm sido por muitos anos uma tecnologia para a transmissão de movimento e de potência, principalmente nas indústrias automotivas, mecânicas e aeronáuticas. Atualmente a inspeção dos perfis evolventes de engrenagens cilíndricas de dentes retos vem sendo realizadas utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) CNC com mesas rotativas e softwares para medições dedicados, podendo ser equipadas com sensores por contato de escaneamento ou sem contato. Neste sentido, a motivação deste trabalho consiste em desenvolver uma estratégia de medição para inspeção do perfil evolvente, determinação do erro e alteração do parâmetro peso, fazendo uso da ferramenta matemática NURBS, de engrenagens cilíndricas de dentes retos utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) CNC equipada com apalpador touch trigger e realizando medição ponto a ponto. Os resultados experimentais demonstram a eficácia, vantagens e desvantagens da metodologia desenvolvida.

Palavras-chave: Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs), NURBS e Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos.

ABSTRACT

Nowadays, the need for products with high dimensional and geometrical accuracy demands narrow tolerance in other areas, mainly in the industry. In addition, Gears have been for many years one of the technologies for the transmission of power, mostly in the automobile, mechanical and aviation industry. Currently, the inspection of the profiles involving spur gears are made using CNC Coordinate Measuring Machines (CMMs) with rotary tables and software for dedicated measurements which can either be equipped with contact scanning sensors or not. In this regard, the motivation on this term paper is to develop a measurement strategy to inspect the said profile, check for errors and when necessary change the weight parameter. To this purpose, we use the mathematical tool NURBS, spur gears by using Coordinate Measuring Machine (CMM), CNC equipped with palpate touch trigger and point-to-point measurements. The experimental results show the efficacy, the advantages and disadvantages of the developed methodology.

Keywords: Coordinate Measuring Machine (CMM), NURBS and Spur Gears.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos principais de uma MMC.	19
Figura 2 – Tipos de estruturas: (a) em balanço, (b) coluna, (c) portal, (d) em L, (e) ponte fixa, (f) ponte móvel, (g) braço horizontal móvel, (h) braço horizontal fixo . . .	19
Figura 3 – Medição em MMC manual	20
Figura 4 – (a) Exemplo de magazine das MMCs (b) Cabeçote em operação para acoplamento do sensor.	22
Figura 5 – Apalpadores touch trigger: (a) uma haste, (b) várias hastes.	23
Figura 6 – Sensores: (a) óptico e (b) a laser.	24
Figura 7 – Fontes de erros de medição nas MMCs.	26
Figura 8 – Representação dos erros geométricos em um eixo da MMC.	27
Figura 9 – Vinte e um erros geométricos de uma MMC tipo portal.	27
Figura 10 – Engrenagem cilíndrica de dentes retos	30
Figura 11 – (a) traçado dos dentes pelo processo da evolvente (b) setor da circunferência na geração do perfil	31
Figura 12 – (a) engrenamento ideal na região do perfil evolvente (b) reta de ação	31
Figura 13 – Efeito do ângulo de pressão no perfil do dente: (a) 14, 5°; (b) 20°; (c) 25° . .	32
Figura 14 – Variação da forma geométrica do dente em função do ângulo de pressão . .	32
Figura 15 – Representação de pontos no espaço Euclidiano para coordenadas homogêneas	35
Figura 16 – Valores de pesos iguais a 1 (a) curva NURBS, (b) funções base B-splines . .	37
Figura 17 – Valor do peso w_9 igual a 10 (a) curva NURBS, (b) funções base B-splines .	37
Figura 18 – Valor do peso w_9 igual a 0.5 (a) curva NURBS, (b) funções base B-splines .	37
Figura 19 – MMC Crysta-Apex S 7106 CNC	38
Figura 20 – Sensores: touch trigger, tipo visão de máquina e laser	39
Figura 21 – Joystick utilizado no movimento do sensor	39
Figura 22 – Menu do software MCOSMOS	40
Figura 23 – Engrenagens utilizadas	40
Figura 24 – Engrenagem posicionada para realização das medições	41
Figura 25 – Aquisição dos pontos coordenados para definição do plano e da origem da MMC	42
Figura 26 – Posicionamento da coordenada horizontal x no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem	43
Figura 27 – (a) Captura dos pontos para criação das linhas e do ponto de intersecção (b) Tela do MCOSMOS identificando as atividades realizadas na máquina . . .	43
Figura 28 – Exemplo de arquivo utilizado, mostrando a rotina de medição	44
Figura 29 – Exemplo de arquivo utilizado, mostrando a rotina de medição e os pontos coordenados medidos	45
Figura 30 – Multiplicando as coordenadas dos pontos de controle pelos pesos w_i	46

Figura 31 – Cálculo do vetor de nós (a) variável <i>knots</i> armazenando o vetor de nós utilizado na função NURBS (b) Função <i>calc_knots</i> para cálculo do vetor de nós (c) código da função <i>qntintervalo</i> para determinar a quantidade de termos entre 0 e 1 do vetor de nós	47
Figura 32 – Tela inicial da interface SIENG-MMC	49
Figura 33 – Tela para seleção de módulo, arquivo e verificação do número de pontos coordenados	49
Figura 34 – Tela para cálculo do erro, geração do perfil evolvente e ajuste dos pesos . . .	50
Figura 35 – Tela da SIENG - MMC ilustrando os resultados dos erros NURBS para engrenagem de módulo 4 mm com 7 pontos coordenados	51
Figura 36 – Tela da SIENG - MMC ilustrando os resultados dos erros NURBS após a correção do parâmetro peso w_i	52
Figura 37 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem A, utilizando 5 pontos coordenados.	54
Figura 38 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem A, utilizando 7 pontos coordenados	55
Figura 39 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem B, utilizando 8 pontos coordenados	56
Figura 40 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem B, utilizando 9 pontos coordenados	57
Figura 41 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem B, utilizando 10 pontos coordenados	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de materias de mesas metrológicas	21
Tabela 2 – Quantidade mínima de pontos para cada geometria.	22
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de medição por contato	25
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de medição sem contato	25
Tabela 5 – Características das engrenagens utilizadas	41
Tabela 6 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem A e 5 pontos coordenados . .	54
Tabela 7 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem A e 7 pontos coordenados . .	55
Tabela 8 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem B e 8 pontos coordenados . .	56
Tabela 9 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem B e 9 pontos coordenados . .	57
Tabela 10 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem B e 10 pontos coordenados .	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design (Projeto Assistido por Computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador)
CNC	Controle Numérico Computadorizado
ISO	International Organization for Standardization
MATLAB	Matrix Laboratory (Software Computacional)
MMCs	Máquinas de Medição por Coordenadas
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
SIENG-MMC	Sistema Para Inspeção de Engrenagens usando Máquinas de Medição por Coordenadas
TTP	Touch Trigger Probe

LISTA DE SÍMBOLOS

x	Coordenada x
y	Coordenada y
z	Coordenada z
ϕ	Ângulo de pressão
$C(u)$	Curva B-Splines
$N_{i,p}(u)$	Função base B-Splines modificada
w	Peso
P	Ponto de controle
$R_{i,p}(u)$	Função de Cox de Boor
$[u_i, u_{i+p+1})$	Intervalo para análise da curva B-Splines
ρ	Grau da função
m	Módulo
Z	Número de dentes
μm	Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	18
2.1.1	Elementos das MMCs	18
2.1.1.1	Estrutura mecânica	19
2.1.1.2	Sistema de apalpação	20
2.1.1.3	Unidade de controle	20
2.1.1.4	Mesa metrológica	21
2.1.1.5	Sistema computacional da MMC	21
2.1.2	Técnicas para medição das peças	22
2.1.2.1	Medição por contato	22
2.1.2.2	Apalpador touch trigger	23
2.1.2.3	Medição sem contato	23
2.1.3	Vantagens e desvantagens apresentadas pelos sistemas de medição com contato e sem contato	24
2.1.4	Fontes de incertezas nas MMCs	25
2.1.4.1	Erros derivados da MMC	26
2.1.4.2	Erros geométricos	26
2.1.4.3	Erros relativos ao sistema de apalpação	28
2.1.4.4	Erros derivados da peça	28
2.1.4.5	Erros derivados do ambiente	29
2.1.4.6	Erros derivados do operador e da estratégia de medição	29
2.2	ENGRENAGEM CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS	29
2.2.1	Geração do perfil evolvente	30
2.3	NURBS	33
2.3.1	Introdução	33
2.3.2	Curvas NURBS	33
2.3.3	Pesos nas curvas NURBS	36
2.3.3.1	Significado geométrico dos pesos	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	DESCRIÇÃO DA MMC	38
3.2	ENGRENAGENS UTILIZADAS	40

3.3	OBTENÇÃO DOS DADOS	41
3.4	ROTINA PARA IMPORTAR OS DADOS E GERAR A CURVA NURBS .	44
3.4.1	Importação dos dados	44
3.4.2	Geração da curva do perfil evolvente usando NURBS	45
3.5	INTERFACE GRÁFICA SIENG-MMC	48
4	RESULTADOS	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICES	
	APÊNDICE A – ROTINA UTILIZADA NO MATLAB	65

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço constante de novas tecnologias principalmente na área industrial, aumentam-se cada vez mais as exigências para garantia da confiabilidade e qualidade dos produtos. Uma das formas mais eficazes para cumprir satisfatoriamente essas exigências é realizando medições mais eficazes, de modo a tornar o processo produtivo mais rápido, com menor custo e maior qualidade. De forma a atender a essas necessidades, se faz necessário sistemas de inspeção cada vez mais exatos e flexíveis (SILVA, 2011).

Segundo Oliveira e Souza (2003), em um ambiente produtivo altamente competitivo e globalizado, a garantia da conformidade geométrica – atender as especificações definidas no projeto – dos projetos é condição indispensável para assegurar a intercambialidade e funcionalidade dos produtos. Para que as perdas e realização de retrabalho sejam minimizadas, o processo de medição exerce uma grande responsabilidade, pois além de inspecionar a conformidade geométrica das peças, em muitos casos deve-se corrigir os desvios e variações no comportamento do processo de fabricação (Nóbrega, 2016).

As técnicas convencionais de inspeção dimensional, não tem sido capazes de atender a tais requisitos exigidos pelas novas tecnologias de manufaturas, que exigem dispositivos que façam o controle dimensional com rapidez, além de baixos e confiáveis níveis de erro, evitando os chamados “gargalos” na fabricação, (Lima Jr, 2007). As Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) têm demonstrado sua capacidade de atender a todos estes requisitos, operando segundo o princípio da metrologia de coordenadas. As MMCs possuem como características marcantes: alta velocidade de inspeção, resultados com exatidão e flexibilidade, ou seja, capacidade de medir peças cuja forma geométrica é considerada complexa. As MMCs são capazes de medir uma grande quantidade de pontos, que conferem características de componentes complexos, muitas vezes realizando operações simples, as contribuições das mesmas reduzem o tempo de inspeção e permite identificar os erros provenientes do processo de manufatura com maior eficiência e rapidez.(SILVA, 2011).

A função básica das MMCs incide na medição da forma real da peça, a comparação com a forma desejada e por fim a avaliação da informação metrológica. A forma real da peça é obtida pelo contato da sua superfície em pontos de medição discretos, que são mostrados em termos de suas coordenadas (Nóbrega, 2011).

Nos dias de hoje praticamente não existem peças, produzidas industrialmente, cujas características dimensionais não possam ser determinadas através de uma MMC, no entanto, tal como sucede com qualquer outra técnica de medição, o processo de aquisição de pontos coordenados por meio de uma MMC não está totalmente isento de erros. Os erros que as MMCs podem apresentar são originados de diversas fontes, a quais são divididas basicamente em dois grupos, sendo estes: o hardware e o sistema computacional (software) (OLIVEIRA; SOUZA, 2003). Para as fontes de erros provenientes do hardware, varias pesquisas tem sido

feitas, desenvolvendo técnicas capazes de minimizar estas fontes de erros. Para os erros devido ao software, existem poucos estudos sendo realizados para a minimização desta fonte de erro (Lima Jr, 2007).

Segundo Nóbrega (2016), frequentemente MMCs sofisticadas são utilizadas com o objetivo de reproduzir um modelo digital preciso a partir de pontos coordenados para posteriormente serem utilizados em sistemas CAD/CAM. É importante destacar que a precisão no processo de medição depende do número de pontos de controle que são capturados na superfície da peça. Consequentemente, os sistemas de inspeção utilizando sensores sem contato a laser são as melhores ferramentas para serem utilizadas para tal finalidade, porém deve-se analisar o custo benefício de tal inspeção comparado com sistemas de medição por contato.

De acordo com Minneto (2003), NURBS são funções paramétricas que podem representar uma variedade de tipos de curvas. Estas funções são utilizadas em computação gráfica na indústria CAD/CAM e estão sendo consideradas um padrão para criação e representação de objetos complexos (indústria automobilística, aviação e embarcação). Atualmente é possível verificar cada vez mais o uso expandido das NURBS, principalmente no modelamento de objetos e aplicação de realidade virtual. Segundo (HONG, 2016), explorar o uso significativo dos pesos w_i da função NURBS é uma das questões mais interessantes e importantes neste campo.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma estratégia de medição para inspeção do perfil evolvente, determinação do erro e alteração do parâmetro peso w_i , baseada em NURBS, de engrenagens cilíndricas de dentes retos utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas CNC, utilizando apalpador touch trigger. Com base nessa metodologia, adaptou-se o sistema computacional desenvolvido por (NÓBREGA, 2016) em sua tese, denominado de: Sistema para Inspeção de Engrenagens usando Máquinas de Medição por Coordenadas, o SIENG – MMC.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma estratégia de medição para inspeção do perfil evolvente, determinação do erro e alteração do parâmetro peso, baseada em NURBS, de engrenagens cilíndricas de dentes retos utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) CNC com apalpador touch trigger.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Adquirir habilidades na inspeção do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos;
2. Estabelecer uma estratégia de medição para coleta de pontos coordenados em MMCs CNC com apalpador touch trigger;

3. Realizar estudos sobre o modelo *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS), para modelagem de curvas e alteração do parâmetro peso de forma automática, reduzindo o erro em cada ponto coordenado, quando necessário;

4. Aprofundar estudos no Matlab para adaptar a plataforma SIENG - MMC, baseada na metodologia apresentada, visando uma melhor interação com o operador.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Segundo Vicente (1977), uma Máquina de Medição de Coordenadas é um sistema mecânico e eletrônico cujo objetivo principal é a obtenção de coordenadas cartesianas de pontos sobre superfícies sólidas.

Segundo (Lima Jr, 2007) , uma MMC pode ser definida como uma máquina composta por uma série de elementos mecânicos dotados de movimentos, um apalpador ou sensor/transdutor e uma mesa metrológica sobre a qual são fixadas as peças a serem medidas.

As Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) são conhecidas pelo seu excelente desempenho na obtenção de valores de coordenadas, sendo um dos sistemas de medição mais flexíveis e dinâmicos para a medição de peças com geometrias complexas.

A tecnologia por trás das medições por coordenadas tem como base o princípio da aquisição de pontos coordenados sobre a peça a ser inspecionada, seguido de um processamento matemático para se determinar a chamada geometria substituta (Nóbrega, 2016).

A obtenção dos pontos coordenados é realizada a partir de vários sensores, podendo ser realizadas com sistemas que utilizam contato direto com a peça ou por sistemas sem contato.

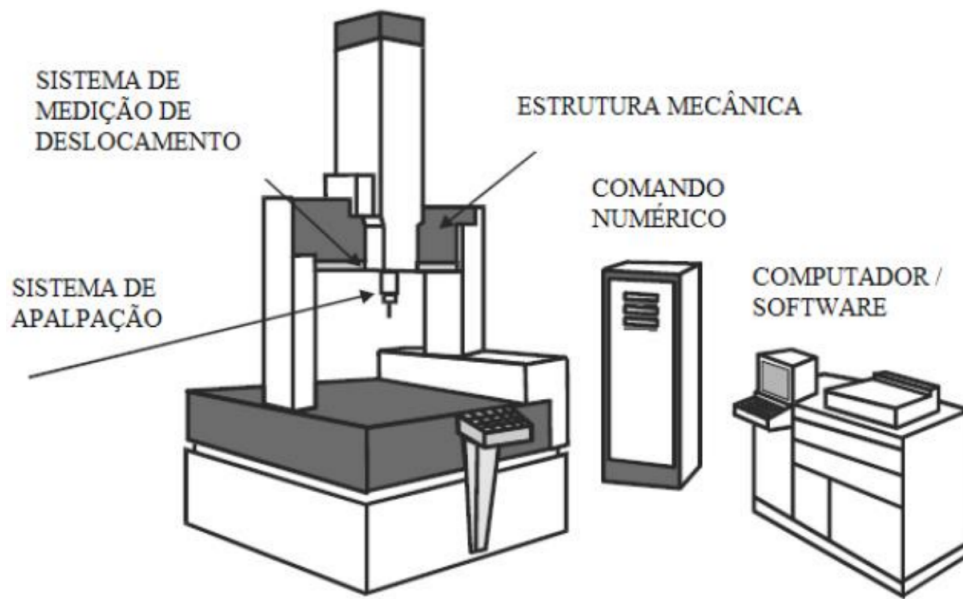
Para Porath (2002), a tecnologia de medição por coordenadas é hoje uma ferramenta já consolidada nos processos de garantia de qualidade dimensional de produtos em indústrias dos mais diversos setores produtivos, além do uso na engenharia reversa. Tem como principais vantagens: alta flexibilidade; alta produtividade; alta informatização e alta precisão.

2.1.1 Elementos das MMCs

De forma geral, os elementos básicos que compõem a MMC estão ilustrados na figura 1, eles são os seguintes:

1. Estrutura mecânica;
2. Sistema de apalpação;
3. Unidade de controle;
4. Mesa metrológica;
5. Sistema computacional da MMC.

Figura 1 – Elementos principais de uma MMC.



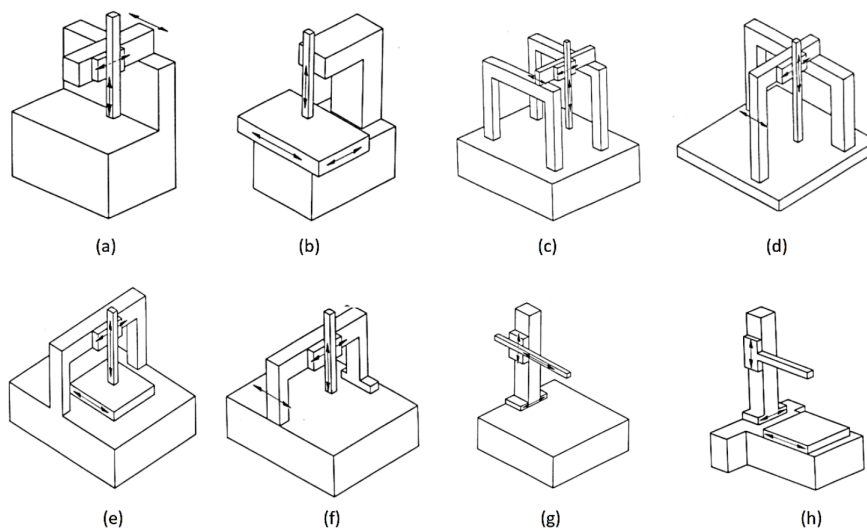
Fonte: (BOSCH, 1995)

2.1.1.1 Estrutura mecânica

Engloba as guias, mancais aerostáticos, colunas, mesa e sistema de acionamento dos eixos e do cabeçote de medição. Existem variados tipos de MMCs, que diferem entre si essencialmente por sua estrutura e pela exatidão de sua medida. Essa variedade de estrutura aliada a flexibilidade e rapidez na realização da medição de diferentes formas geométricas e tamanhos contribuíram para a disseminação dessa tecnologia em diversas áreas (Soares Jr, 2010).

As estruturas das máquinas são ilustradas na figura 2.

Figura 2 – Tipos de estruturas: (a) em balanço, (b) coluna, (c) portal, (d) em L, (e) ponte fixa, (f) ponte móvel, (g) braço horizontal móvel, (h) braço horizontal fixo



Fonte: (PINHEIRO, 2018)

2.1.1.2 Sistema de apalpação

O sistema de apalpação é um dos principais elementos da MMC. Ele é o elemento que entra em contato com a superfície da peça por meio do sensor, fornecendo à máquina a informação a respeito de sua localização em relação ao sistema de coordenadas da MMC (Lima Jr, 2007).

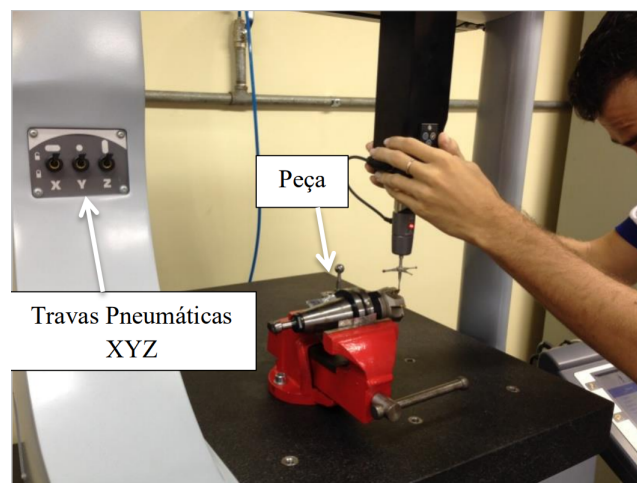
Os apalpadores podem ser divididos em dois grupos principais: Os apalpadores de contato e os apalpadores sem contato (sensores).

2.1.1.3 Unidade de controle

A unidade de controle é responsável pelo acionamento dos eixos, fornecendo ao usuário informações a respeito das medições. (LIRA, 2016) classifica as unidades de controle em quatro tipos: manual, com eixos motorizados, controlada por controle numérico computadorizado (CNC) e comandada por computador, com uma descrição detalhada a seguir:

1. MMC manual: consiste em uma máquina que o controle dos braços que sustentam o sistema de apalpação e a fixação de eixos é feito de forma totalmente manual como pode-se observar na figura 3, seus indicadores se comunicam com um computador pessoal ou notebook.

Figura 3 – Medição em MMC manual



Fonte: (Nóbrega, 2016)

2. MMC com eixos motorizados: Nesse tipo de máquina, o movimento de cada eixo é controlado pelo usuário por meio de um joystick ligado a máquina, com a entrada dos dados no computador feita pelo sensor eletrônico. Esse sistema é bastante muito utilizado na medição de peças grandes, em que o acesso do operador para movimentar o sensor é difícil.

3. MMC controlada por controle numérico (CNC): desenvolvida principalmente para medições em série e de peças complexas. Para cada tipo de peça é gravado um programa com a sequência de movimentos realizados, obtendo os pontos especificados. Os movimentos para o programa são realizados na primeira peça, guiados com o auxílio de um joystick e gravados em

memória. Nas medições posteriores, repete o ciclo, fazendo o sensor percorrer a peça e realizando a medição automaticamente. O mesmo movimento é repetido com precisão, possibilitando assim medições com rapidez e exatidão para grandes lotes de uma mesma peça.

4. MMC assistida e comandada por computador: Os movimentos do sensor são programados a partir das coordenadas x, y e z. Podendo ser realizada a troca dos sensores durante a medição e da movimentação motorizada da ponta de contato.

2.1.1.4 Mesa metrológica

Incorporada a MMC, serve como base de referencia, onde sobre ela são fixadas as peças a serem medidas. Geralmente são feitas em granito, por possuir uma elevada estabilidade química e homogeneidade, permitindo criar uma superfície que apresente um elevado grau de planeza e cuja dureza faz com que a mesma seja resistente aos choques motivados pelo uso. A tabela 1 apresenta algumas propriedades do granito, bem como os de outros materiais que podem ser utilizados na fabricação da mesa metrológica (Lima Jr, 2003).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de materias de mesas metrológicas

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade de massa (kg/m^3)	Rigidez por massa ($10^7 m^2/s^2$)	Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}C$)	Condutividade térmica (W/m. $^{\circ}C$)
Aço	200	7800	2,56	11,6	97,00
Alumínio	70	2780	2,52	23,0	176,00 - 300,00
Cerâmica	303	3700	8,18	6,0	25,00
Invar	140	8130	1,72	0,8 - 2,0	10,00
Granito	25	2800	0,89	5,4	1,87 - 4,04

Fonte: (Lima Jr, 2007)

2.1.1.5 Sistema computacional da MMC

O sistema computacional é responsável por enviar as informações para a unidade de controle, fazendo uso de algoritmos matemáticos para definir as chamadas geométricas substitutas.

Os programas utilizados para medir e analisar os elementos geométricos necessitam de um determinado número de medidas para definir algumas geometrias como pode-se ver na tabela 2. Pode-se cada vez mais aumentar o número de pontos obtidos para aumentar a exatidão da medida (LIRA, 2016).

Tabela 2 – Quantidade mínima de pontos para cada geometria.

Geometria	Quantidade de Pontos
Plano	3
Círculo	3
Distância entre retas paralelas	3
Esfera	4

Fonte: (LIRA, 2016)

2.1.2 Técnicas para medição das peças

Atualmente as máquinas de medição por coordenadas incorporam a chamada magazine, contendo esta uma variedade de tipos de sensores, podendo estes ser divididos em dois grandes grupos: sensor por contato e sensor sem contato. Cada vez mais o processo se torna automatizado, visando à redução da intervenção do operador no processo de inspeção de peças, algumas MMCs possuem a função para mudança dos sensores de forma automática, podendo ainda selecionar o melhor sensor para determinada medição (Nóbrega, 2016).

Na figura 4 pode-se observar dois tipos diferentes de magazines, com diferentes tipos de sensores. Pode-se observar também a presença do cabeçote durante a operação, onde é possível selecionar o melhor sensor para ser utilizado para uma determinada medição.

Figura 4 – (a) Exemplo de magazine das MMCs (b) Cabeçote em operação para acoplamento do sensor.



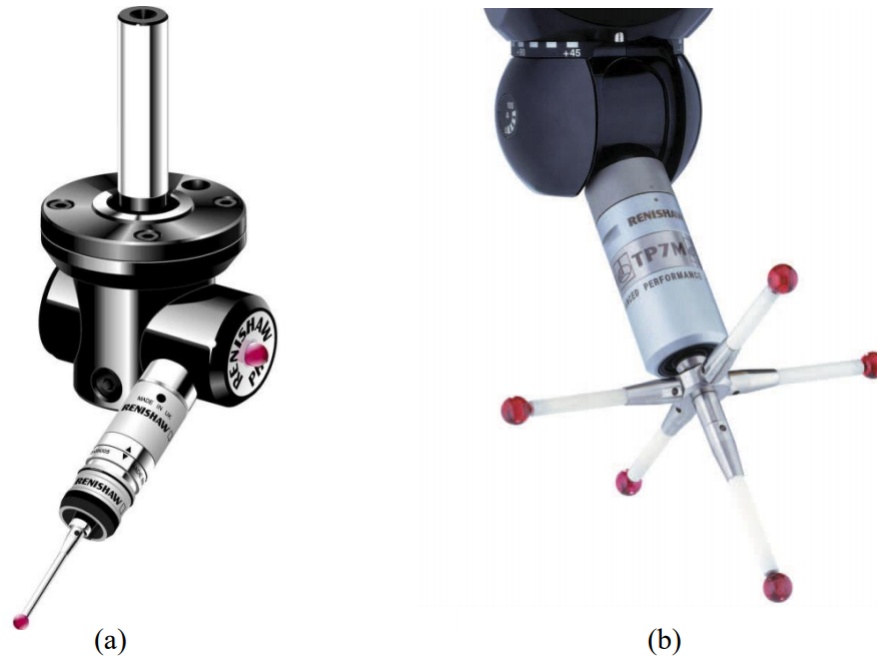
Fonte: (Nóbrega, 2016)

2.1.2.1 Medição por contato

Duas técnicas de medição podem ser utilizadas para realização das medições, a técnica conhecida como ponto a ponto que utilizam os apalpadores touch trigger, e a técnica de escaneamento contínuo que utilizam os apalpadores scanning probes, sendo estes também conhecidos como probes de digitalização. No processo de medição o cabeçote da máquina pode utilizar uma

única haste ou várias hastes, como ilustrado na figura 5, dependendo da necessidade no processo de medição (Nóbrega, 2016).

Figura 5 – Apalpadores touch trigger: (a) uma haste, (b) várias hastes.



Fonte: (PINHEIRO, 2018)

2.1.2.2 Apalpador touch trigger

Afirma Nóbrega (2016), que independente da tecnologia a ser utilizada, o sensor de medição é o dispositivo responsável pela identificação do ponto a ser considerado.

Quando entra em contato com a peça, o sensor é acionado, gerando um sinal elétrico e sonoro para congelar a leitura dos indicadores digitais, o sistema de controle da máquina para que o mesmo capture imediatamente os valores registrados nos indicadores de deslocamento individuais de cada eixo e os considere como as coordenadas X, Y e Z do ponto que gerou o acionamento do sensor, determinando assim a localização do ponto medido (Nóbrega, 2016).

A ponta do apalpador que entra em contato com a superfície da peça a ser medida normalmente é feita de rubi, contribuindo para minimizar os efeitos dos desgastes (Lima Jr, 2007).

2.1.2.3 Medição sem contato

A medição nem sempre é possível de ser realizada por contato, muitas vezes as peças são de dimensões pequenas ou possuem baixa resistência mecânica, tornando inviável sua medição com os apalpadores de contato, em outras temos a necessidade de um maior número de pontos coletados em um intervalo de tempo menor.

O sistema de medição sem contato, assim como no sistema por contato, tem como principal objetivo a aquisição de coordenadas de um ponto localizado numa superfície da qual se pretende obter medições, sem realizar contato com a peça (SILVA, 2011).

Utilizados para medições com maior amostragem de pontos e em um menor tempo, estão disponíveis os sensores do tipo visão de máquina (óptico) e de leitura a laser (NÓBREGA, 2016).

Figura 6 – Sensores: (a) óptico e (b) a laser.



Fonte: (PINHEIRO, 2018)

2.1.3 Vantagens e desvantagens apresentadas pelos sistemas de medição com contato e sem contato

Diante das mais variadas técnicas de medição de contato e sem contato, apresenta-se a seguir uma análise comparativa feita por (SILVA, 2011) em seu trabalho de tese, de ambos os métodos em relação as suas principais vantagens e desvantagens.

A tabela 3 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos sistemas de medição com o uso de apalpadores.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de medição por contato

Medição por contato
Vantagens <ul style="list-style-type: none"> - Quando comparado com sistemas de medição sem contato apresentam maior grau de precisão e exatidão; - Não é afetado pela iluminação ambiente, portanto, tem boa repetibilidade; - Sistema considerado flexível; Incertezas de medição baixas.
Desvantagens <ul style="list-style-type: none"> - Baixa velocidade durante a coleta de dados; - Desgaste dos apalpadores; - Cuidado na fixação das peças; Durante a medição pode ocorrer deformação ou flexão da peça.
Fonte: (SILVA, 2011)

A tabela 4 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos sistemas de medição sem contato.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de medição sem contato

Medição sem contato
Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> - Total ausência de contato com a superfície a medir; - Muito utilizada em projetos de engenharia reversa; - Medição de superfícies de formas complexas com maior rapidez; - Não há deformação ou flexão na peça; - Permite digitalizar modelos com maior facilidade.
Desvantagens: <ul style="list-style-type: none"> - Podem ocorrer problemas devido ao ângulo de reflexão; - Incerteza de medição ainda alta; - Os pontos coletados são limitados ao campo de visão ou faixa do laser; - Possibilidade de existir distorções provocadas pelas lentes.
Fonte: (SILVA, 2011)

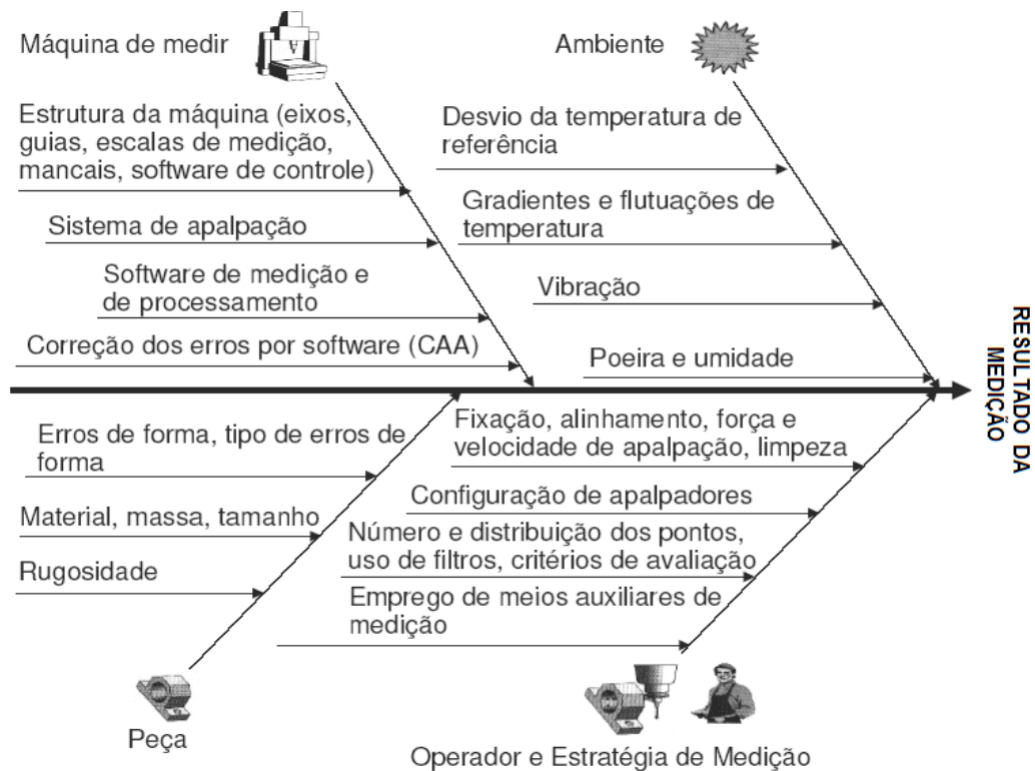
2.1.4 Fontes de incertezas nas MMCs

Apesar da constante modernização e aplicação da tecnologia avançada, a técnica de medição por coordenadas apresenta erros.

De acordo com Albertazzi (2008), por melhor que seja o a qualidade do sistema de medição, por mais cuidadoso e habilidoso que seja o operador e por mais bem controladas que sejam as condições ambientais, ainda assim, em maior ou menor grau, o erro de medição estará presente.

Segundo a literatura as fontes de incertezas associadas a medição por coordenadas podem ser classificadas dentro de quatro grupos, são eles: máquina de medição, ambiente de medição, peça e operador juntamente com estratégia de medição. A figura 7 destaca um diagrama com as principais causas que podem influenciar o resultado de uma medição realizada numa MMC e seus subgrupos.

Figura 7 – Fontes de erros de medição nas MMCs.



Fonte: (OLIVEIRA; SOUZA, 2003)

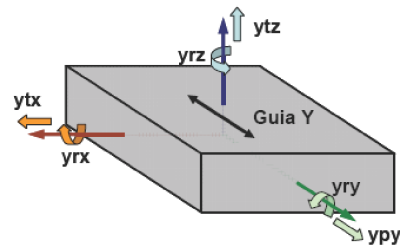
2.1.4.1 Erros derivados da MMC

2.1.4.2 Erros geométricos

Os erros que mais influenciam os resultados das medições estão nas fontes de erros internos ao sistema, os erros geométricos estão classificados dentro deste grupo, e de acordo com (ROLIM, 2003), estes representam a maior fonte de desvios nos resultados das medições realizadas com as MMCs.

A figura 8 nos mostra o modelo de um corpo rígido, no qual o mesmo servirá como referência para representar os seis graus de liberdade do eixo y da máquina, ou seja, será considerado apenas uma guia (guia Y).

Figura 8 – Representação dos erros geométricos em um eixo da MMC.



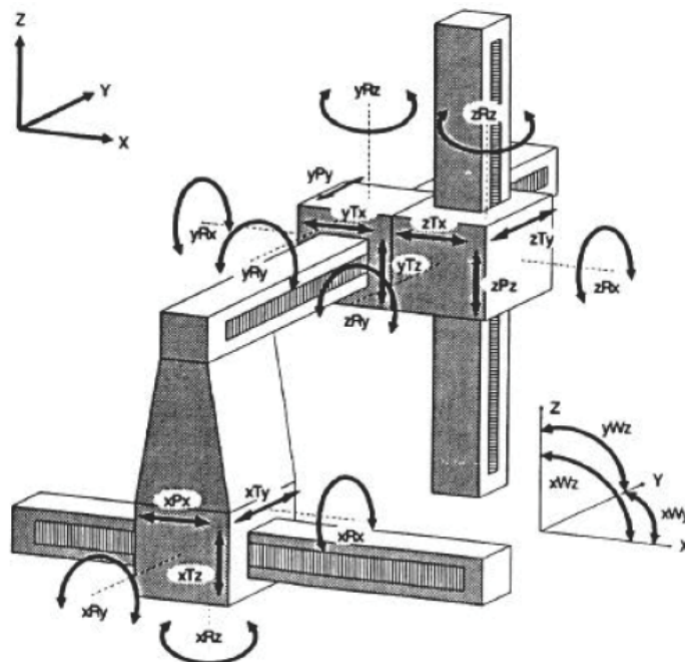
Fonte: (ARENHART, 2007)

Têm-se como exemplo numa máquina com 3 (três) eixos, para cada um deles 6 (seis) componentes de erros geométricos, somando 18 erros para MMC. A estes se somam ainda os 3 (três) erros de perpendicularidade/esquadro entre os eixos da máquina, totalizando-se 21 (vinte e um) erros como ilustra a figura 9 (NóBREGA, 2016).

Os 6 (seis) graus de liberdade são:

- Três movimentos de translação: na direção x, y, z;
- Guinada (yaw): em torno do eixo Z (y_{rz});
- Tombamento (pitch): em torno do eixo X (y_{rx});
- Rolagem (roll): em torno do próprio eixo Y (y_{ry}).

Figura 9 – Vinte e um erros geométricos de uma MMC tipo portal.



Fonte: (NORONHA, 2003)

Existem ainda programas computacionais específicos denominados de CAA (Computer Aided Accuracy) que são oferecidos pelos próprios fabricantes das MMCs, que são utilizados como opção para correção dos erros geométricos e das escalas. Esses programas utilizam informações detalhadas dos erros da MMC obtidas a partir da aplicação de padrões de referência como placas de esferas, por exemplo. Esse método ainda é limitado, uma das limitações é a garantia da estabilidade e das condições da máquina e do ambiente para que a matriz de erros identificada no ensaio possa ser utilizada, sendo essa uma condição mais realística para máquinas instaladas em laboratórios de referência (Soares Jr, 2010).

2.1.4.3 Erros relativos ao sistema de apalpação

Como descrito, a aquisição dos pontos coordenados da peça é realizada pelo sistema de apalpação, os erros provocados por esse sistema tem componentes aleatórios e sistemáticos, cuja amplitude depende muito das condições de seu uso, pode-se citar como exemplos o tempo de uso, manuseio pelos operadores, severidade das colisões, etc. (Nóbrega, 2016).

Afirma Nóbrega (2016), que os erros causados pelo sistema de apalpação são caracterizados por desvios na posição de referência do apalpador. Classificando como algumas das potenciais causas de erros dos apalpadores do tipo TTP:

Rigidez limitada: Principal causa do efeito conhecido na literatura como pré-deslocamento, pelo balanço de forças estabelecido quando o sensor entra em contato com a peça;

Erros do sistema eletrônico: podendo ser observado principalmente com apalpadores comutadores quanto ao atraso no tempo de resposta dos circuitos eletrônicos (Nóbrega, 2011);

Efeitos térmicos: Devido aos deslocamentos que pode sofrer a localização do centro da esfera caso haja dilatação da haste. Além disso, a deformação térmica de componentes internos pode comprometer o seu funcionamento (Nóbrega, 2011);

Erros geométricos: resultados de limitações envolvendo o processo de fabricação e fenômenos que podem ocorrer durante a utilização do sensor (Nóbrega, 2016).

2.1.4.4 Erros derivados da peça

Com relação aos erros relacionados a peça a ser medida, são normalmente considerados os fatores de influência: seu acabamento superficial, as propriedades termomecânicas do material (coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade) além de erros dimensionais, de forma e posição dos elementos de interesse da peça (Soares Jr, 2010).

Cabe ressaltar que os fatores de influência atribuídos a peça sempre estão associados a condições de origem externa a máquina de medição, grande parte dessas condições está presente geralmente por necessidade de projeto (propriedades de material) ou por serem propriedades inerentes ao processo de produção (rugosidade, erros de forma) (ARENHART, 2007).

2.1.4.5 Erros derivados do ambiente

Destaca-se a temperatura por poder invalidar o resultado da medição, principalmente em peças com pequena massa e sensíveis a variações de temperatura no ambiente de medição. As variações de temperaturas são mais críticas por serem de natureza aleatória e ter a impossibilidade de eliminação dessa fonte de erro (ARENHART, 2007).

Deve-se observar também os efeitos causados por vibrações, principalmente de fontes externas a MMC, pode-se destacar as máquinas ferramentas, compressores de ar, e os equipamentos de ventilação. A forma mais efetiva de controlar esse efeito seria controlando suas fontes, isolando a MMC (Lima Jr, 2007).

2.1.4.6 Erros derivados do operador e da estratégia de medição

De forma geral, a maioria dos usuários de MMCs acredita que os erros são provocados principalmente pela própria máquina e pelas condições ambientais, entretanto diversos trabalhos ressaltam a importância de uma adequada estratégia de medição e de fixação da peça para garantia de uma qualidade mínima na inspeção geométrica do produto (Soares Jr, 2010).

Dentre os erros derivados da estratégia de medição, as que mais afetam o resultado das medições são o número de pontos medidos e a localização destes sobre a superfície da peça.

Deve-se levar em consideração que a geometria da peça nem sempre é conhecida, seus desvios de forma podem ser fontes consideráveis de erros, principalmente se o número de pontos medidos sobre a superfície é reduzido, ou se esses pontos estão mal distribuídos sobre a peça, seja por questão de dificuldade de acesso devido a geometria da peça ou por uma estratégia de medição inadequada (ARENHART, 2007).

Para reduzir esse tipo de erro, são necessários sistemas inteligentes, capazes de analisar a geometria da peça a ser medida e decidir o algoritmo, a quantidade de pontos e a distribuição dos mesmos da forma mais apropriada para a medição, evitando assim que as decisões a respeito destes critérios sejam tomadas pelo operador da MMC (WECKENMANN, 1995).

2.2 ENGRENAGEM CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS

As engrenagens são elementos básicos muito utilizados principalmente na transmissão de potência entre eixos, ou eixos-arvores. Dentre os vários tipos de engrenagens existentes, um dos mais comuns são as engrenagens cilíndricas de dentes retos. Nestas engrenagens os dentes são dispostos paralelamente entre si e em relação ao eixo como ilustra a figura 10 (KODA, 2009).

Figura 10 – Engrenagem cilíndrica de dentes retos



Fonte: (KODA, 2009)

Afirma Koda (2009), que estes elementos permitem a redução ou aumento de torque e velocidades, com mínimas perdas de energia.

Têm-se como um dos parâmetros de extrema importância na transmissão realizada por engrenagens, a relação de transmissão, ela representa se a transmissão será do tipo redutora ou amplificadora. Para engrenagens em geral a relação de transmissão é dada pela equação:

$$i = \frac{D_{p2}}{D_{p1}} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_{t2}}{M_{t1}}$$

Onde:

D_{p1} = diâmetro primitivo da roda motora;

D_{p2} = diâmetro primitivo da roda movida;

Z_1 = número de dentes da roda motora;

Z_2 = número de dentes da roda movida;

n_1 = rotação da engrenagem 1;

n_2 = rotação da engrenagem 2;

M_{t1} = torque do pinhão 1;

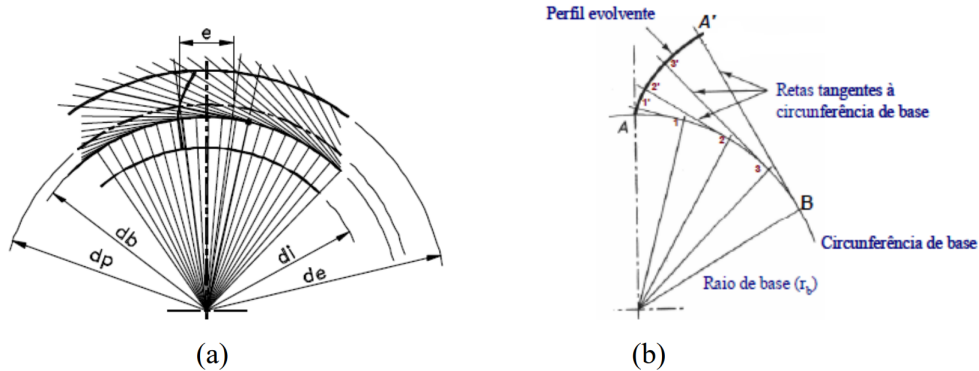
M_{t2} = torque da coroa 2.

2.2.1 Geração do perfil evolvente

O perfil evolvente de uma engrenagem é gerado a partir de retas tangentes a uma circunferência, denominada circunferência de base. A circunferência é caracterizada pelo seu diâmetro de base (d_b) e pela espessura circular do dente e , como pode-se observar na figura 11. No primeiro momento, a reta tangencia a circunferência num ponto qualquer, chamado de A e a

partir daí passa a rolar sem deslizamento sobre a circunferência de base, descrevendo no espaço os pontos $A, 1', 2', 3' e A'$, como pode ser observado na figura 11 (Nóbrega, 2016).

Figura 11 – (a) traçado dos dentes pelo processo da evolvente (b) setor da circunferência na geração do perfil

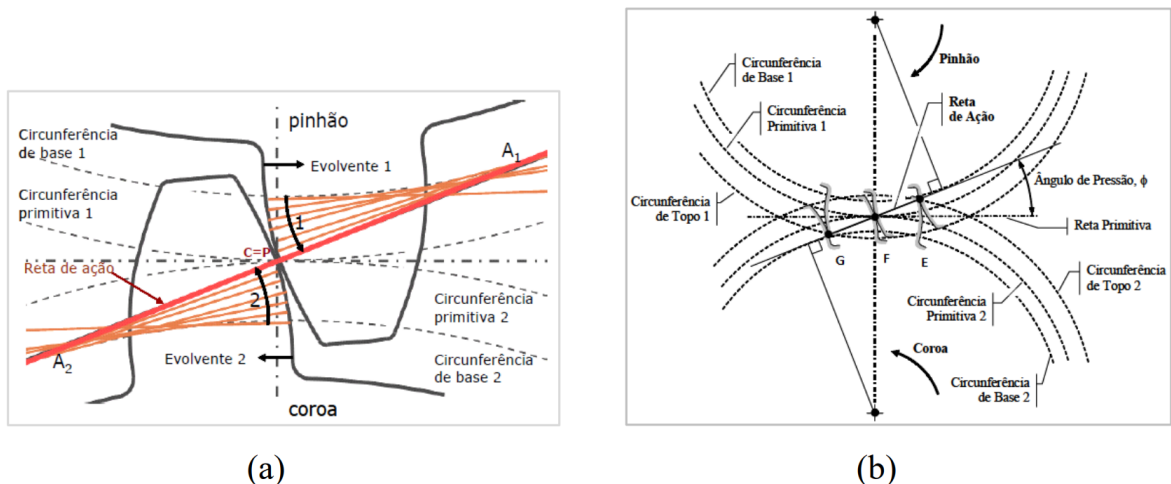


Fonte: (Nóbrega, 2016)

Neste caso, o perfil evolvente corresponde ao arco AA' e equivale a uma das formas geométricas dos dentes de engrenagens.

Se duas engrenagens possuem perfis ideais, o movimento de engrenamento será contínuo e as engrenagens entram em contato apenas na região do perfil evolvente, como ilustra a figura 12, que destaca o engrenamento entre coroa e pinhão, na qual a evolvente 1 e evolvente 2, cada uma gerada a partir de sua respectiva circunferência de base, se encontram a partir do ponto de contato P (Lima Jr, 2007).

Figura 12 – (a) engrenamento ideal na região do perfil evolvente (b) reta de ação



Fonte: (Lima Jr, 2007)

Segundo Nóbrega (2016), se as condições citadas anteriormente forem obedecidas, o ponto P , durante o engrenamento, se desloca de E para G , sobre a reta de ação, como pode-se observar na figura 12, esta reta é tangente as circunferências de base de ambas as engrenagens e perpendicular aos perfis evolventes.

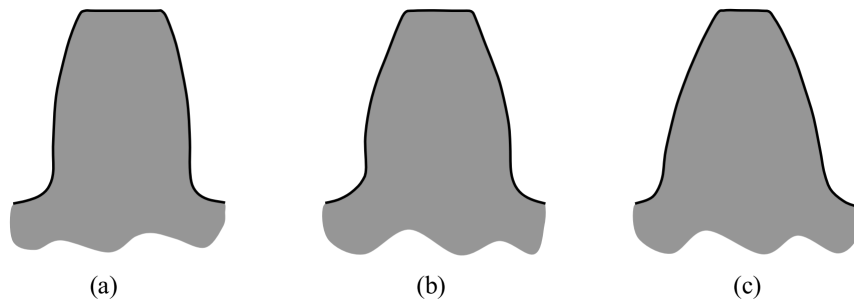
O ângulo de pressão ϕ , corresponde ao ângulo formado pela reta de ação e a reta perpendicular a reta que une os dois centros das engrenagens, é de fundamental importância na determinação das cargas nos flancos dos dentes, se relacionando diretamente com a variação das forças que agem sobre as engrenagens (NÓBREGA, 2016).

Afirma Flores (2014), que o ângulo de pressão é um dos principais parâmetros característicos do desempenho das engrenagens, este parâmetro é normalizado e assume, em geral, o valor de 20° .

Segundo Gasparin (2004), o ângulo de pressão define o formato do dente, enquanto que o módulo define o tamanho do dente.

A figura 13 ilustra a evolvente (ou formato do dente), variando de acordo com o ângulo de pressão, pode-se observar que quanto maior for o ângulo de pressão mais longo será o dente.

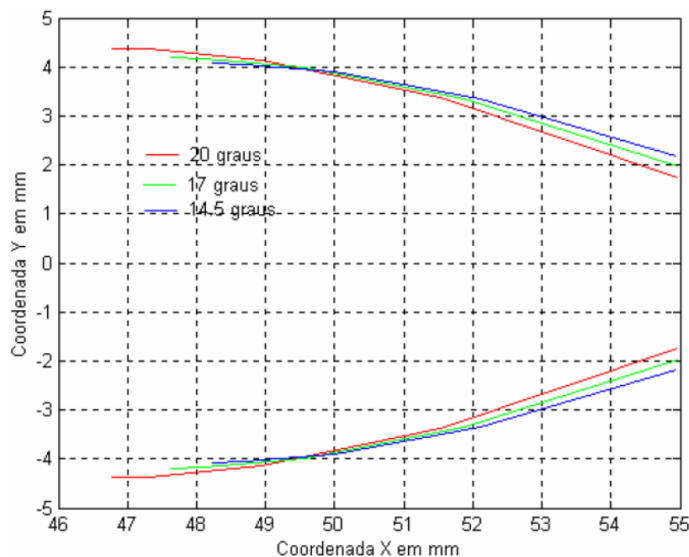
Figura 13 – Efeito do ângulo de pressão no perfil do dente: (a) $14,5^\circ$; (b) 20° ; (c) 25°



Fonte: (FLORES, 2014)

Lima Jr (2007), nos apresenta em seu trabalho de tese, a influência do ângulo de pressão na forma geométrica do dente e, por meio de simulação, demonstra que quanto maior for o ângulo ϕ mais longo será o dente, como ilustra a figura 14.

Figura 14 – Variação da forma geométrica do dente em função do ângulo de pressão



Fonte: (Lima Jr, 2007)

2.3 NURBS

2.3.1 Introdução

Non Uniform Rational B-Spline, comumente conhecida como NURBS, tem se tornado um padrão na indústria para representação, concepção e troca de informações geométricas processadas por computadores, suas excelentes propriedades matemáticas e algorítmicas, quando combinadas com as aplicações industriais bem sucedidas tem contribuído para sua enorme popularidade. As funções NURBS permitem adaptar curvas e superfícies polinomiais tanto para a representação de forma livre como para as formas geométricas comuns, isso graças a manipulação dos graus de liberdade que tem tais funções e sua formulação matemática, permitindo assim um controle de aproximação local por meio dos pesos w_i e pontos de controle (Nóbrega, 2016).

Segundo Pizo (2009), para aperfeiçoar a aproximação mediante curvas e superfícies NURBS, deve-se modificar seus graus de liberdade a fim de minimizar a distância entre a representação paramétrica e o conjunto de dados.

2.3.2 Curvas NURBS

Afirma Nóbrega (2016) que uma importante ferramenta para modelagem de curvas durante a aquisição de dados em um processo de inspeção ou engenharia reversa é utilizando NURBS.

Embora as curvas B-splines sejam muito utilizados em projetos de curvas, elas não conseguem representar curvas com formatos simples, como no caso de círculos e elipses. Portanto, para representar formas como estas, é necessário uma extensão das curvas racionais, usando coordenadas homogêneas, de onde obtêm-se o nome B-splines Racional Não Uniforme (MINNETO, 2003).

Segundo Aquino e Carvalho (2003), a NURBS é uma ferramenta industrial padrão para representação e design de geometrias simples e complexas, e apresentam as seguintes aplicações:

1. Representar formas analíticas padrões e formas livres;
2. Fornecer uma alta flexibilidade no design das formas;
3. Quando se deseja um tempo de processamento computacional razoavelmente pequeno.

Minneto (2003) e Silva (2011), mostram porque a ferramenta NURBS é tão importante na construção de projetos geométricos:

- O projeto NURBS é intuitivo onde quase todo algoritmo tem um fácil entendimento de interpretação geométrica;

- Os algoritmos NURBS são rápidos e numericamente estáveis;
- NURBS são generalizações de curvas e superfícies B-splines racionais e não racionais;
- NURBS podem representar formas complexas, através de poucos dados;
- NURBS provêm uma base matemática, unificada para representar ambas as formas analíticas como seções cônicas e superfícies quadráticas, além de entidades de formas livres, como corpos de carros, de navios e aviões;
- As curvas NURBS permitem representar formas arbitrárias, enquanto mantem exatidão e independência de resolução matemática.

Matematicamente, uma curva NURBS de grau n , pode ser definida pela Equação (2.1):

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (2.1)$$

com $a \leq u \leq b$

Onde P_i são os pontos de controle da curva, $N_{i,p}$ são funções básicas B-spline de grau p e cada valor real w_i é um peso associado ao ponto de controle P_i .

As funções racionais são definidas através da Equação (2.2) :

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u)w_j} \quad (2.2)$$

Portanto a partir das Equações (2.1) e (2.2), a equação das curvas NURBS pode ser representada pela Equação (2.3) :

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u)P_i \quad (2.3)$$

com $a \leq u \leq b$

Afirma Silva (2011), que quando se deseja manipular em ambiente computacional os mais diversos tipos de transformações (translação e rotação, por exemplo) é conveniente utilizar-se de uma estrutura compactada para representá-las, chamada de coordenadas homogêneas.

Segundo Albuquerque (2006), é possível concatenar-se várias matrizes de transformação tais como rotação, translação, projeções, alterações de peso localmente, etc., em apenas uma matriz, bastando apenas para isso multiplicar as diversas matrizes de modo a obter uma única matriz de transformação.

No espaço euclidiano tridimensional as coordenadas podem ser definidas em $P = (x, y, z)$, mas no espaço onde as coordenadas são homogêneas elas passam a ser escritas como :

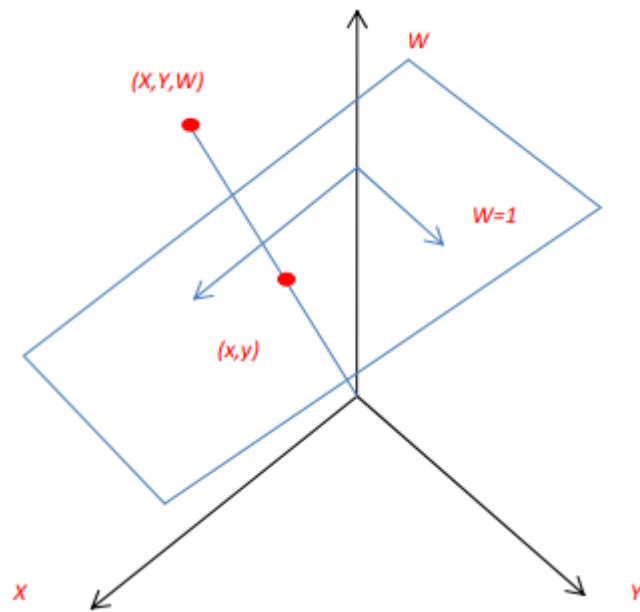
$$P^w = (wx, wy, wz, w) \quad (2.4)$$

onde w são os pesos.

Neste caso, para a determinação da NURBS é necessário deixar o ponto de controle P_i ser reescrito como um vetor coluna com quatro componentes, como apresentado na equação (2.5) :

$$P_i^w = (w_i x, w_i y, w_i z, w) \quad (2.5)$$

Figura 15 – Representação de pontos no espaço Euclidiano para coordenadas homogêneas



Fonte: (SILVA, 2011)

Para Silva (2011), assim como nas curvas B-spline, apresenta as principais propriedades das funções base NURBS considerando a Equação (2.1):

1. Não negatividade- para todo i e p , $R_{i,p}(u)$ é não negativo;
2. $R_{i,p}(u)$ é uma função racional de grau p ;
3. Suporte local, ou seja, $R_{i,p}(u)$ é i, não-nulo em $[u_i, u_{i+p+1})$;
4. Partição da unidade, ou seja, a soma de todas as funções base não-nulas de grau p no período $[u_i, u_{i+1})$ é 1;

5. Se o número de nós é $m + 1$, o grau das funções base é p e o número de funções base de grau p é $n + 1$, então $m = n + p + 1$;
6. Em qualquer período de nó $[u_i, u_{i+1})$, no máximo $p + 1$ funções base de grau p são não nulas, ou seja, $R_{i-p,p}(u), R_{i-p+1,p}(u), R_{i-p+2,p}(u), \dots, R_{i,p}(u)$;
7. Função base $R_{i,p}(u)$ é uma curva composta de funções racionais de grau p com pontos de acoplamento nos nós em $[u_i, u_{i+p+1})$;
8. Se $w_i = c$ para todo i , onde c é uma constante não-nula, $R_{i,p}(u) = N_{i,p}(u)$.

2.3.3 Pesos nas curvas NURBS

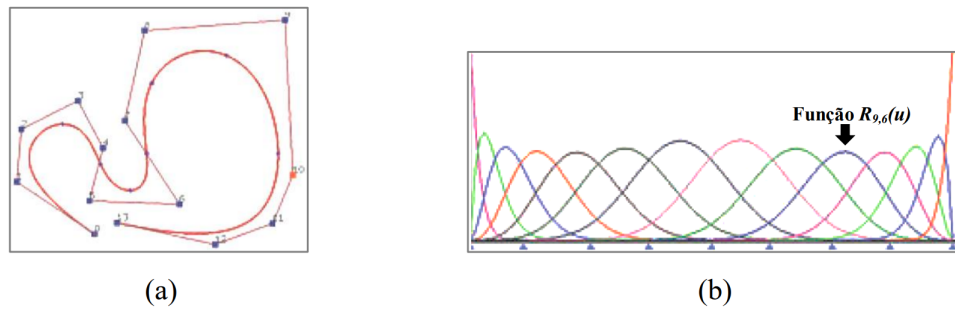
A primeira fonte de estudos dos efeitos dos pesos w_i nas curvas NURBS foi realizada na tese de doutorado de Verprille, em 1975. A partir desta, vários outros estudos vêm sendo desenvolvidos, explorando o significado geométrico dos pesos e introduzindo uma abordagem mais ampla, na qual conseguem modificar a forma da curva NURBS alterando seus pesos e localização dos pontos de controle, simultaneamente. (PIZO, 2009) apresenta o efeito da modificação do peso w_i associado ao ponto de controle P_i , no qual somente afeta a curva no intervalo $[u_i, u_{i+p_{grau}+1})$ (Nóbrega, 2016).

2.3.3.1 Significado geométrico dos pesos

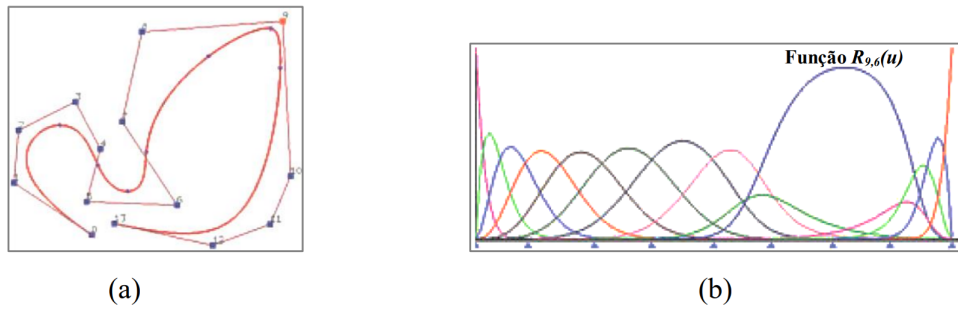
Nóbrega (2016), mostrou em sua tese que qualitativamente acrescentando/diminuindo o valor de w_i , será acrescentado/diminuído o valor de $R_{i,p}(u)$, como mostrado na Equação 2.2. Mais precisamente, incrementando o valor de w_i , a curva será puxada em direção ao ponto de controle P_i . De fato, todos os pontos afetados na curva também serão puxados em direção ao referido ponto coordenado. Quando w_i tende ao infinito, a curva passará pelo ponto de controle, por outro lado, ao diminuir este parâmetro a curva se afastará do ponto P_i .

Para exemplificar o que foi descrito anteriormente, a figura 16 ilustra, respectivamente, o formato de uma curva NURBS de grau 6 juntamente com suas funções base B-spline, para valores de peso iguais a 1. Nesse exemplo demonstrativo, será analisado o ponto P_9 . Com o aumento de w_9 para 10, a função B-spline correspondente $R_{9,6}(u)$ torna-se maior, e a curva é levada em direção ao ponto de controle P_9 , como ilustra a figura 17. Com a diminuição de w_9 para 0.5, a função base correspondente torna-se menor, e a curva é empurrada para longe do ponto P_9 , como ilustrada na figura 18 (Nóbrega, 2016).

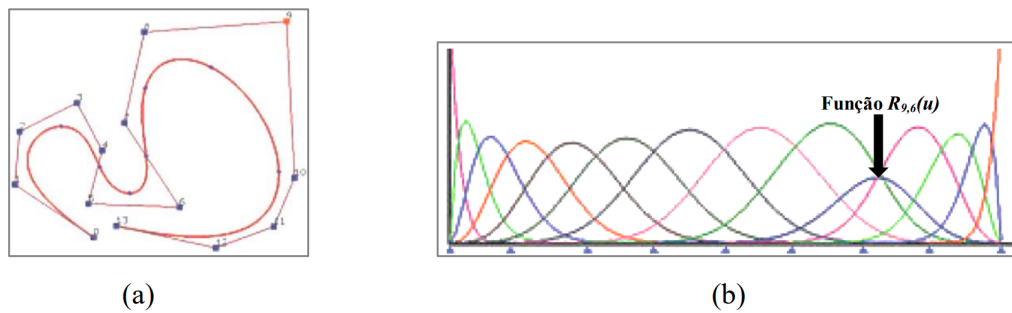
Figura 16 – Valores de pesos iguais a 1 (a) curva NURBS, (b) funções base B-splines



Fonte: (NóbREGA, 2016)

Figura 17 – Valor do peso w_9 igual a 10 (a) curva NURBS, (b) funções base B-splines

Fonte: (NóbREGA, 2016)

Figura 18 – Valor do peso w_9 igual a 0.5 (a) curva NURBS, (b) funções base B-splines

Fonte: (NóbREGA, 2016)

3 METODOLOGIA

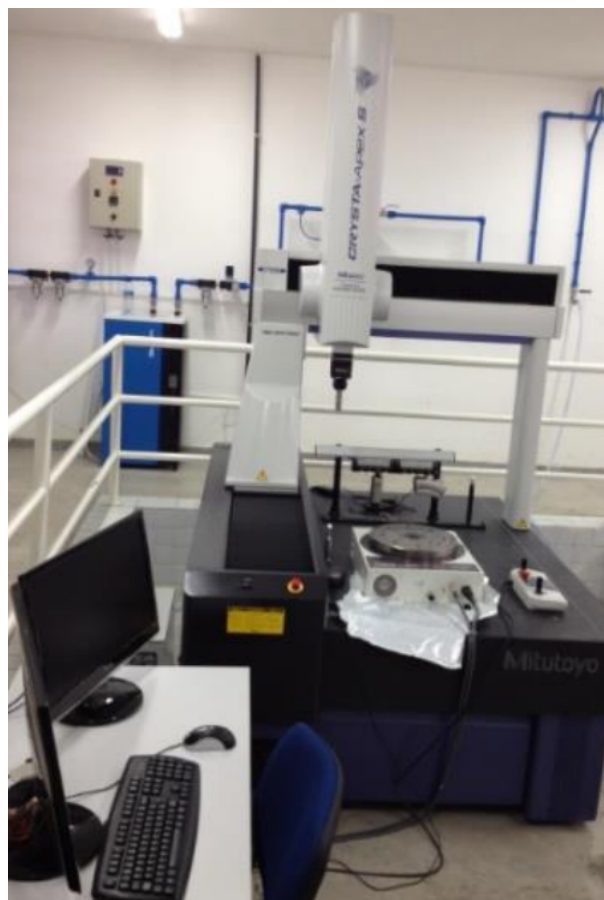
No capítulo anterior foi realizada uma extensa revisão bibliográfica para fundamentação teórica em relação às Máquinas de Medição por Coordenadas, as técnicas de medições utilizadas nas mesmas e as principais fontes de incertezas, bem como um estudo sobre as engrenagens cilíndricas de dentes retos e sobre as curvas NURBS. Todo este conteúdo foi essencial para desenvolvimento deste trabalho.

Neste capítulo será apresentado a descrição relativa à máquina utilizada e a estratégia na obtenção dos dados adquiridos, e a partir dos mesmos a metodologia que foi empregada no processo de identificação e o desenvolvimento do programa.

3.1 DESCRIÇÃO DA MMC

A máquina utilizada para a obtenção dos dados foi a máquina de medição por coordenadas CNC da marca Mitutoyo, modelo Crysta-Apex S 7106, ilustrada na figura 19, localizada no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da Universidade Federal da Paraíba.

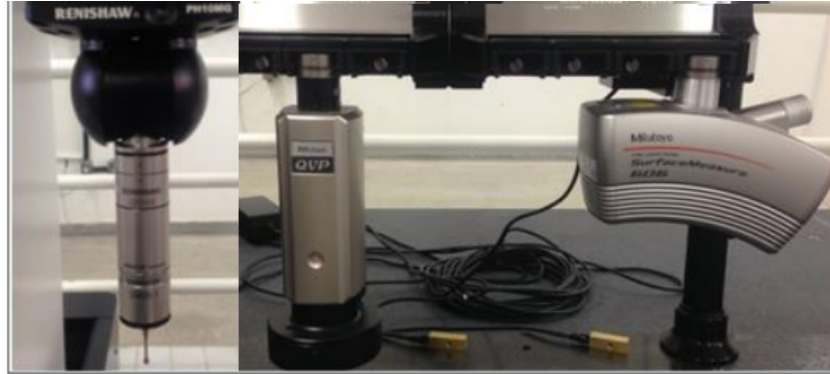
Figura 19 – MMC Crysta-Apex S 7106 CNC



Fonte: (NÓBREGA, 2016)

Para realização das medições foi utilizado o sensor apalpador SP25M. Sensores do tipo visão de máquina e laser também integram a MMC. A figura 20 ilustra os sensores.

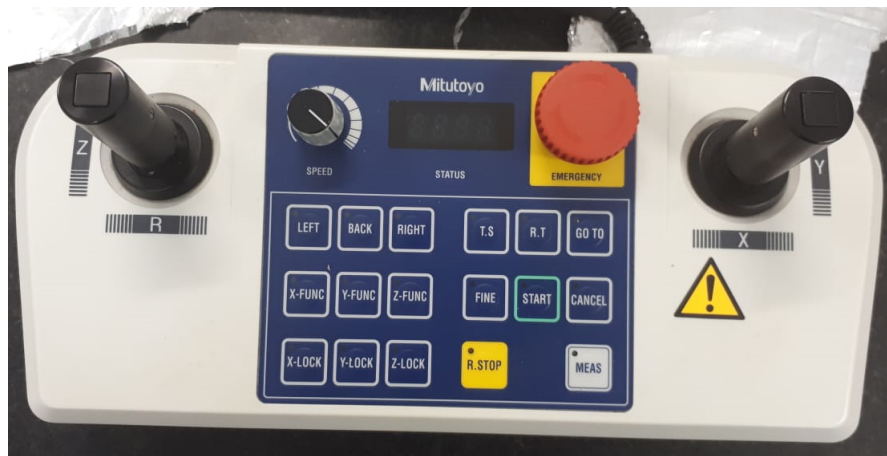
Figura 20 – Sensores: touch trigger, tipo visão de máquina e laser



Fonte: (NóbREGA, 2016)

O movimento do sensor é controlado pelo operador por meio de um joystick ligado a máquina, como ilustra a figura 21, com a entrada dos dados no computador feita pelo sensor eletrônico.

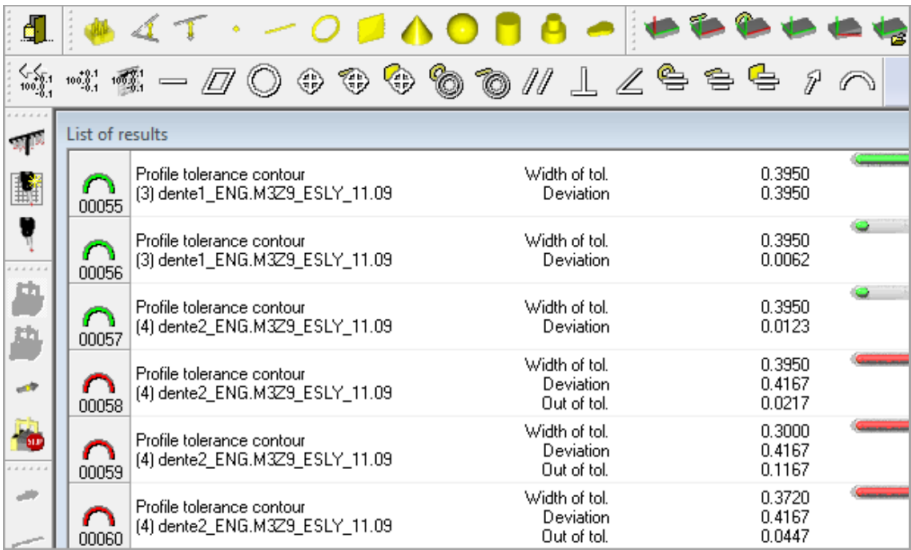
Figura 21 – Joystick utilizado no movimento do sensor



Fonte: Produzida pelo autor.

O software da máquina é o MCOSMOS. De acordo com (Lima Jr, 2007), o MCOSMOS integra todos os sistemas computacionais em um único sistema, no qual o programa genérico é o principal e os demais são os módulos dentro deste, em que todos utilizam os mesmos sistemas de coordenadas e banco de dados. A figura 22 ilustra o menu do MCOSMOS.

Figura 22 – Menu do software MCOSMOS



List of results					
00055	Profile tolerance contour (3) dente1_ENG.M3Z9_ESLY_11.09	Width of tol.	0.3950		
		Deviation	0.3950		
00056	Profile tolerance contour (3) dente1_ENG.M3Z9_ESLY_11.09	Width of tol.	0.3950		
		Deviation	0.0062		
00057	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M3Z9_ESLY_11.09	Width of tol.	0.3950		
		Deviation	0.0123		
00058	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M3Z9_ESLY_11.09	Width of tol.	0.3950		
		Deviation	0.4167		
		Out of tol.	0.0217		
00059	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M3Z9_ESLY_11.09	Width of tol.	0.3000		
		Deviation	0.4167		
		Out of tol.	0.1167		
00060	Profile tolerance contour (4) dente2_ENG.M3Z9_ESLY_11.09	Width of tol.	0.3720		
		Deviation	0.4167		
		Out of tol.	0.0447		

Fonte: (NóbREGA, 2016)

3.2 ENGRENAGENS UTILIZADAS

Para obtenção dos dados duas engrenagens forem utilizadas, as quais encontram-se no LEP e estão ilustradas na figura 23. A tabela 5 apresenta as principais características destas engrenagens. Vale ressaltar que as medições foram realizadas nos dentes marcados como 1 e 3, das engrenagens de módulos 6 e 4 respectivamente.

Figura 23 – Engrenagens utilizadas



Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 5 – Características das engrenagens utilizadas

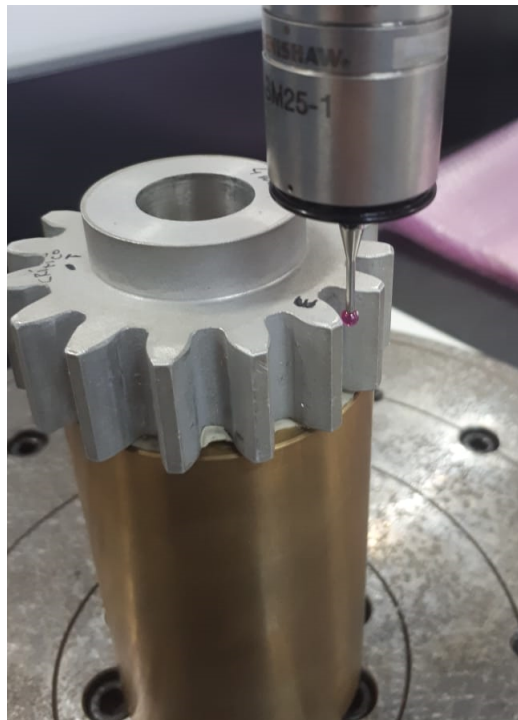
Especificações	Módulo (m)	Número de dentes (Z)	Ângulo de pressão (ϕ)	Material
Engrenagem A	4 mm	16	20°	Alumínio
Engrenagem B	6 mm	13	20°	Alumínio

Fonte: Produzida pelo autor.

3.3 OBTENÇÃO DOS DADOS

Para realizar as medições, fazendo-se uso de massa de modelar, as engrenagens foram fixadas sobre uma base cilíndrica, localizada em cima da mesa metrológica da MMC como ilustrado na figura 24.

Figura 24 – Engrenagem posicionada para realização das medições



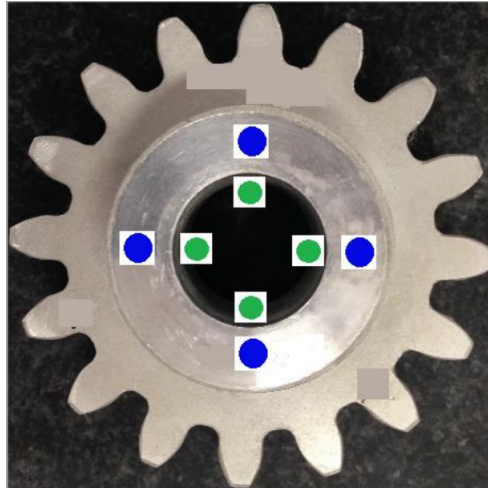
Fonte: Produzida pelo autor.

Como padrão, a MMC Crysta-Apex S 7106 CNC define o plano e a origem do sistema de coordenadas na extremidade superior da máquina, porém é possível reposicioná-los e definidos na engrenagem que será inspecionada. Neste sentido, seguindo a sequência, foram determinados:

- **O plano:** para alinhamento da MMC com a peça, capturando quatro pontos na superfície da engrenagem;
- **A origem:** deslocada para o furo central da engrenagem, capturando quatro pontos no interior do furo referido;

A figura 25 indica, aproximadamente, os locais em que os pontos foram coletados, sendo nas cores azul e verde para definição do plano e origem, respectivamente.

Figura 25 – Aquisição dos pontos coordenados para definição do plano e da origem da MMC



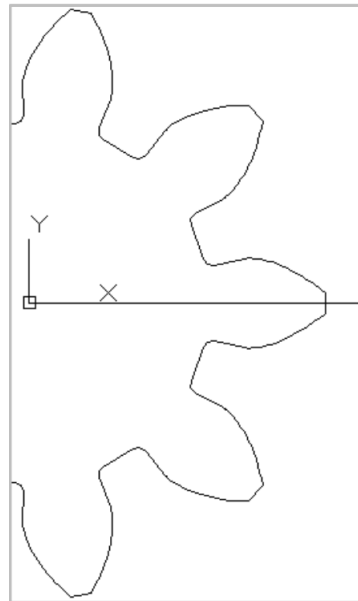
Fonte: (Nóbrega, 2016)

Nóbrega (2016), desenvolveu uma estratégia para realização do alinhamento do sistema de coordenadas da máquina com o sistema de coordenadas da peça, no sentido de garantir coerência nos resultados de sua avaliação nos desvios de perfil. Sendo assim, além de transladar a origem do sistema de coordenadas para o furo central da engrenagem, se fez necessário posicionar o eixo horizontal (x) passando no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem, como pode ser observado na figura 26.

Nóbrega (2016), descreveu o seguinte algoritmo para alcançar esse procedimento:

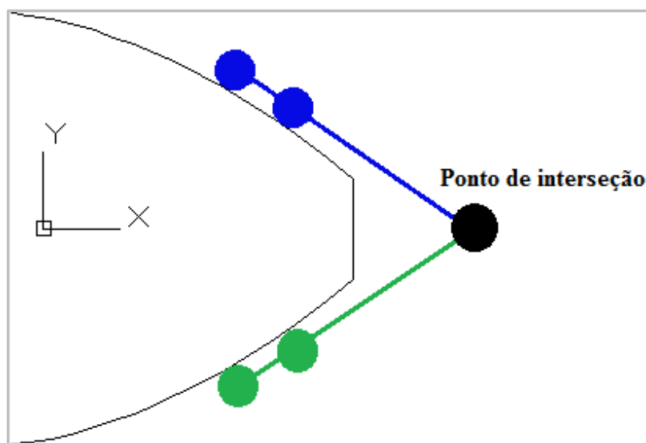
1. Capturar dois pontos do lado esquerdo do perfil evolvente do dente para criação de uma primeira linha. Na figura 27 (a) é possível observar os pontos e a linha representada na cor azul. A figura 27 (b) ilustra a tela do software MCOSMOS sendo fiel as atividades de medição;
2. Capturar mais dois pontos do lado direito do dente para criação de mais uma linha, sendo estes elementos representados na figura 27 (a) na cor verde. Percebe-se que as linhas criadas se interceptam em um determinado ponto, no qual corresponde a aproximadamente o centro do perfil;
3. Na interseção das linhas, criar um ponto, determinado na figura 27 (a) de ponto de interseção e , logo após, traçar uma linha entre a origem do sistema de coordenadas e este novo ponto criado;
4. Definir a linha escrita no item anterior como o eixo x da máquina, e automaticamente, cria-se uma nova linha vertical perpendicular a qual será o eixo y do sistema de coordenadas.

Figura 26 – Posicionamento da coordenada horizontal x no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem

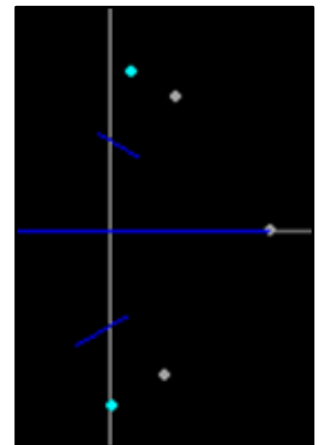


Fonte: (Nóbrega, 2016)

Figura 27 – (a) Captura dos pontos para criação das linhas e do ponto de intersecção (b) Tela do MCOS-MOS identificando as atividades realizadas na máquina



(a)



(b)

Fonte: (Nóbrega, 2016)

A figura 28 mostra o exemplo do arquivo de uma das medições realizadas, pode-se observar os dados contidos no arquivo de acordo com a rotina de medição citada.

Figura 28 – Exemplo de arquivo utilizado, mostrando a rotina de medição

Protocol number (0)

User name

Admin

Part name

Erick

17.04.2019 14:09

1	2	3	4					
El. No.	Lin No	Element	Pnt. Ref	X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	3	Plano 1 Mean (a)	4	-2.4214	0.4399	371.6544		0.0002
				90.3733	89.9322	0.3794		
1	7	circulo 1 Mean (b)	4	339.0524	313.3678	-1.9167	21.1511	0.0026
1	10	Linha 1 (c)	2	205.8118	401.1490	0.0000	450.8647	
				27.1604	117.1604	90.0000		
2	13	Linha 2 (d)	2	-55.6040	138.2278	0.0000	148.9924	
				21.9131	68.0869	90.0000		
1	16	Ponto 1 Intersection element (e)		378.1702	312.7195	0.0000		
3	17	Linha 3 (f)	2	6.1785	318.8852	-18.2265	319.4654	

Fonte: Produzida pelo autor

Pode-se observar na figura 28:

- (a) O plano;
- (b) A origem, localizada no centro da engrenagem;
- (c) A linha gerada pelos dois pontos do lado esquerdo do perfil evolvente do dente;
- (d) A linha gerada pelos dois pontos do lado direito do perfil evolvente do dente;
- (e) O ponto de interseção gerado pelas duas linhas dos itens (c) e (d);
- (f) A linha gerada pela origem do centro de coordenadas e o ponto criado no item (e).

3.4 ROTINA PARA IMPORTAR OS DADOS E GERAR A CURVA NURBS

3.4.1 Importação dos dados

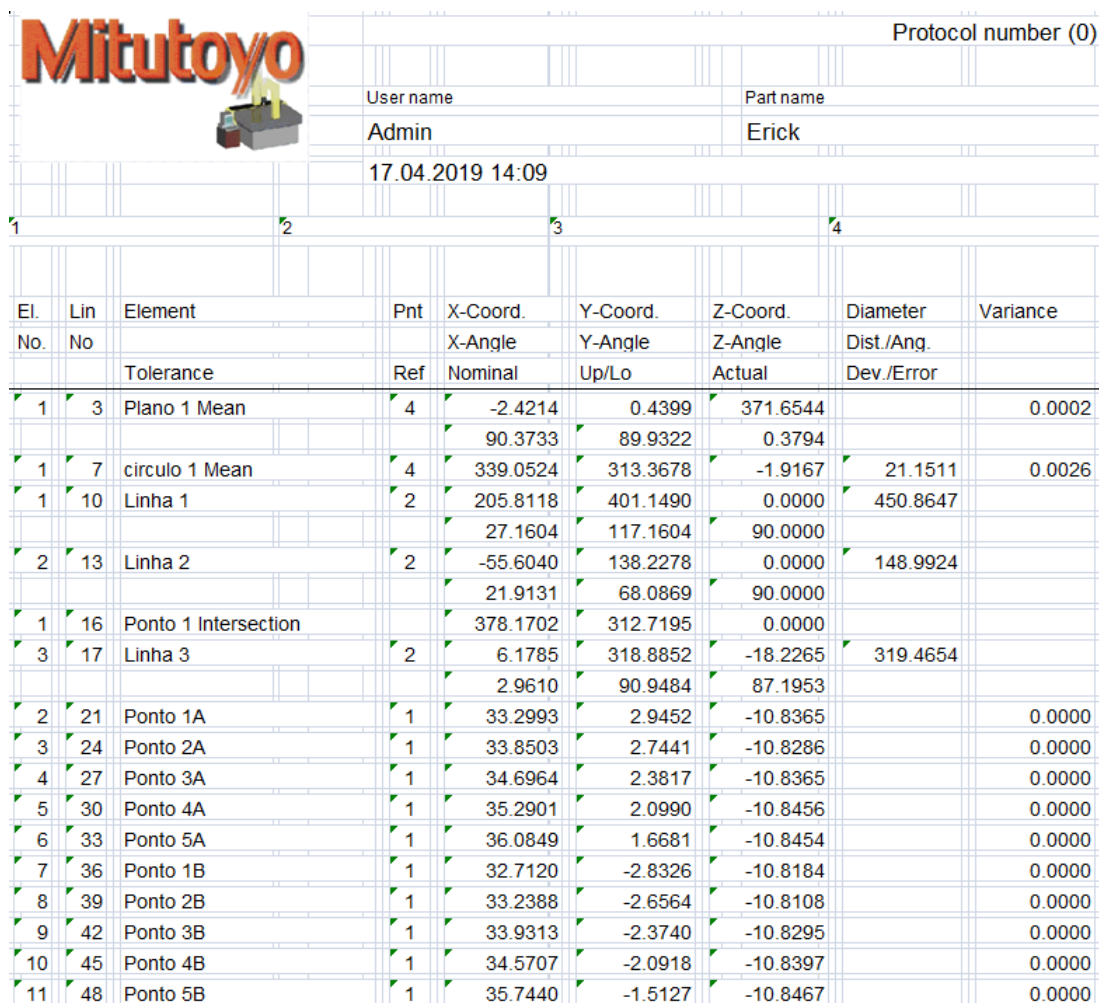
Como definido no Capítulo 2, um dos dados de entrada para geração do perfil evolvente da engrenagem são os pontos de controle, que serão os pontos obtidos pelas medições realizadas na MMC.

Lima Jr (2007), desenvolveu uma rotina para geração do perfil evolvente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, no qual os dados podem ser armazenados numa planilha com extensão *.xls*.

Para importar os dados da planilha gerada na MMC foi utilizado o software *Matlab* versão R2016a, a rotina utilizada para importar e selecionar apenas os dados que contêm informações relevantes a equação NURBS encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

A figura 29 ilustra o exemplo de um arquivo gerado pela MMC, a medição de cinco pontos coordenados para cada lado do dente medido, pode-se observar também a rotina para a realização das medições e as coordenadas dos pontos citados.

Figura 29 – Exemplo de arquivo utilizado, mostrando a rotina de medição e os pontos coordenados medidos



El. No.	Lin No.	Element	Pnt Ref	X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	3	Plano 1 Mean	4	-2.4214 90.3733	0.4399 89.9322	371.6544 0.3794		0.0002
1	7	circulo 1 Mean	4	339.0524	313.3678	-1.9167	21.1511	0.0026
1	10	Linha 1	2	205.8118 27.1604	401.1490 117.1604	0.0000 90.0000	450.8647	
2	13	Linha 2	2	-55.6040 21.9131	138.2278 68.0869	0.0000 90.0000	148.9924	
1	16	Ponto 1 Intersection		378.1702	312.7195	0.0000		
3	17	Linha 3	2	6.1785 2.9610	318.8852 90.9484	-18.2265 87.1953	319.4654	
2	21	Ponto 1A	1	33.2993	2.9452	-10.8365		0.0000
3	24	Ponto 2A	1	33.8503	2.7441	-10.8286		0.0000
4	27	Ponto 3A	1	34.6964	2.3817	-10.8365		0.0000
5	30	Ponto 4A	1	35.2901	2.0990	-10.8456		0.0000
6	33	Ponto 5A	1	36.0849	1.6681	-10.8454		0.0000
7	36	Ponto 1B	1	32.7120	-2.8326	-10.8184		0.0000
8	39	Ponto 2B	1	33.2388	-2.6564	-10.8108		0.0000
9	42	Ponto 3B	1	33.9313	-2.3740	-10.8295		0.0000
10	45	Ponto 4B	1	34.5707	-2.0918	-10.8397		0.0000
11	48	Ponto 5B	1	35.7440	-1.5127	-10.8467		0.0000

Fonte: Produzida pelo autor

3.4.2 Geração da curva do perfil evolvente usando NURBS

A metodologia para geração da curva do perfil evolvente do dente utilizando a ferramenta NURBS, foi desenvolvida por (NóbREGA, 2016) em sua tese, por meio de uma caixa de ferramentas do *Matlab* que têm como finalidade a representação de geometrias diversas e consiste em um conjunto de rotinas para criação das NURBS.

Estas rotinas de programação foram desenvolvidas por (ZHANG, 2008), tendo como prefixo de identificação *nrb*, por exemplo, as funções *nrbmak* e *nrbplot*, que têm como obje-

tivos, respectivamente: construção da NURBS a partir de pontos coordenados, pesos e nós; e representação gráfica da curva. Segundo (Nóbrega, 2016) o código desenvolvido pelo autor supracitado tem como função realizar o desenho da geometria, porém: cálculos para geração do vetor de nós; leitura de pontos coordenados; determinação dos valores de erros entre as curvas teórica e NURBS; rotina para inserção dos valores do parâmetro peso w_i e suas possíveis alterações quando necessário; além da interface gráfica para auxiliar o operador no momento das inspeções, foram desenvolvidos no âmbito de seu trabalho de tese.

Após realizar a rotina para leitura e seleção das coordenadas dos pontos utilizados, é criada a variável *cpnts1* e *cpnts2*, que relacionam aos dois lados do dente. Essas variáveis correspondem aos pontos coordenados da equação NURBS, são armazenadas as coordenadas dos pontos, e as colunas da primeira até *npts*, que faz referência a quantidade de pontos coordenados medidos. As quatro linhas lidas da planilha para o *Matlab* correspondem as coordenadas x, y, z e w , sendo a coordenada z sempre igual a zero, por considerarmos as medições apenas nos eixos x e y , mantendo a coordenada z fixa, e a variável w sendo o peso w_i .

Esse código específico consiste, na sua totalidade em: ler o arquivo com todas as informações contidas no mesmo, no formato *string*; selecionar os dados que serão utilizadas; montar a matriz com os dados pertinentes à geração da curva NURBS e, por fim, transformar os dados dessa matriz em uma variável do tipo *double*.

Após importar para o software os dados citados, as coordenadas dos pontos de controle p_i são multiplicadas pelo peso w_i , no sentido de obter a forma de coordenadas homogêneas. Então, nas linhas de programação do *Matlab* têm-se a seguinte rotina, Figura 30:

Figura 30 – Multiplicando as coordenadas dos pontos de controle pelos pesos w_i

```
% MULTIPLICANDO AS COORDENADAS DOS PONTOS APALPADOS (pi) COM wi PARA OBTER A FORMA EM COORDENADAS
% HOMOGÊNEAS.
cpnts1(1,:) = cpnts1(4,:).*cpnts1(1,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos valores de x (primeira linha).
cpnts1(2,:) = cpnts1(4,:).*cpnts1(2,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos valores de y (segunda linha).
cpnts1(3,:) = cpnts1(4,:).*cpnts1(3,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos valores de z (terceira linha).
```

Fonte: Produzida pelo autor

Assim como os pontos de controle, o vetor de nós e sua estrutura também são informações necessárias para a construção da curva NURBS. Para determinação da quantidade de elementos que contém o vetor de nós e sua criação, (Nóbrega, 2016) desenvolveu uma rotina em ambiente computacional, na qual, para sua formação necessita-se das seguintes informações: número de pontos de controle e o grau da função nurbs.

Afirma Minneto (2003), que para construção de uma curva desconhecida consegue-se, com uma função de grau três $\rho = 3$, ter uma boa modelagem. Seguindo tal orientação, foram utilizadas funções de grau três para representar as formas livres criadas neste trabalho.

Seguindo a rotina utilizada por (Nóbrega, 2016), a figura 31 (a) ilustra a variável *knots* (nós) armazenando a função *cal_knots* (cálculo do vetor de nós), sendo esta última

dependente de duas variáveis: *npts* e *degree*, que correspondem ao número de pontos de controle e grau da função NURBS, respectivamente. A figura 31 (b) apresenta uma rotina para determinação do vetor de nós, pode-se identificar na figura citada a presença de mais uma função, chamada *qntintervalo*. A figura 31 (c) apresenta essa função, que tem como objetivo determinar a quantidade de termos que devem constar no vetor de nós entre o intervalo de valores de 0 e 1, que corresponde a estrutura do vetor. A quantidade de 0 (zeros) e 1 (uns) dependem do grau da função.

Figura 31 – Cálculo do vetor de nós (a) variável *knots* armazenando o vetor de nós utilizado na função NURBS (b) Função *calc_knots* para cálculo do vetor de nós (c) código da função *qntintervalo* para determinar a quantidade de termos entre 0 e 1 do vetor de nós

```
knots = calc_knots(npts,degree);
```

%USANDO A FUNÇÃO 'calc_knots' PARA DEFINIR O VETOR DE NÓS

(a)

```
function vetor = calc_knots(numberPoints, grau)
    intervalo = qntintervalo(numberPoints, grau);
    vetor = zeros(1, 2*(grau+1) + intervalo);
    vetor(1, grau+1:grau+intervalo+2) = 0:1/(intervalo+1):1;
    vetor(1, size(vetor,2)-grau+1:size(vetor,2)) = ones(1, grau);
```

%FUNÇÃO PARA CALCULAR O VETOR DE NÓS

(b)

```
function saida = qntintervalo(pontosdecontrole, p)
    n = (pontosdecontrole-1);
    m = n + p + 2;
    pc = m - (2*(p+1));
    saida = pc;
```

(c)

Fonte: (NÓBREGA, 2016)

A partir dos dados carregados e calculados no ambiente computacional, pode-se construir a curva desejada por meio das funções *nrbmak* e *nrbplot*, contidos na caixa de ferramentas do *Matlab*.

De posse dos pontos de controle obtidos e dos seus correspondentes na curva NURBS, desenvolveu-se um código para calcular os valores de erros, no qual corresponde a distância entre tais pontos.

O código de programação para o cálculo do erro foi armazenado em uma função chamada de *ClosetsPoints* (pontos mais próximos), que seleciona os pontos da curva NURBS mais próximos dos pontos de controle. Neste caso, no código desenvolvido, obtêm-se duas matrizes, para só então fazer a diferença entre os respectivos valores.

3.5 INTERFACE GRÁFICA SIENG-MMC

Para fins de facilitar, e ilustrar de melhor forma, a metodologia desenvolvida para inspeção do perfil evolvente e análise das curvas NURBS, com base oriundos de MMC CNC, no formato de *excel(.xls)*, foi adaptada a partir da plataforma criada na tese de (NóBREGA, 2016), em ambiente computacional *Matlab GUI (Graphical User Interface)*, nomeada na referida tese de SIENG – MMC (Sistema de Inspeção de Engrenagens usando MMC), no sentido de orientar o operador nos procedimentos de inspeção e utilização do sistema. Segundo o autor supracitado a plataforma SIENG – MMC armazena o código computacional e as informações pertinentes à apresentação do resultado final das medições. O funcionamento automático desta plataforma é dado pelo preenchimento e seleção das informações de dados de entrada que serão apresentados/solicitados na tela.

Na geração da interface *GUI* são criados dois arquivos, um arquivo de figura com a extensão *.fig* contendo as informações pertinentes ao funcionamento da plataforma, botões, textos, gráficos, e um arquivo com o sufixo *.m*, contendo a função principal da *GUI* e suas sub-funções.

Para cada objeto inserido na plataforma é gerada uma sub-função, em que pode-se determinar o tipo de ação do elemento por meio de linhas de programação. As telas gráficas utilizadas neste trabalho serão apresentadas na sequência de funcionamento.

Ao executar o software computacional *matlab* e selecionar a plataforma no formato *.fig* para ser executada na *GUI*, será apresentada a interface inicial da SIENG – MMC, como ilustrado na figura 32, tendo continuidade pelo acesso ao botão Iniciar Medições. Outra opção de botão a ser acessada na plataforma inicial é o de Fechar, que finaliza o sistema.

Figura 32 – Tela inicial da interface SIENG-MMC



Fonte: Produzida pelo autor

Ao clicar no botão de Iniciar medições será apresentada a tela ilustrada na figura 33:

Figura 33 – Tela para seleção de módulo, arquivo e verificação do número de pontos coordenados

DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

Selecionar Arquivo:

Arquivo : ← 2

Módulos Disponíveis no Sistema:

m = 4 mm ▾ ← 1

Observações:

Número de pontos:

Ângulo de Pressão: 20°

3 →

Fonte: Produzida pelo autor

Nesta tela o operador deverá:

1. Selecionar o módulo da engrenagem que se deseja inspecionar;

2. Clicar no botão Arquivo, e selecionar o arquivo proveniente da máquina, em formato *.xls*, de acordo com o módulo selecionado anteriormente;
3. Ao selecionar o arquivo, o número de pontos do arquivo será mostrado na tela, devendo o operador então pressionar o botão Carregar Plataforma.

Após realizar esses procedimentos, a SIENG – MMC realiza o processamento abrindo a plataforma correspondente ao módulo e número de pontos selecionados. Na figura 34 é ilustrado o painel desenvolvido para análise do perfil evolvente de engrenagens com módulo 4 mm e 7 pontos coordenados.

Figura 34 – Tela para cálculo do erro, geração do perfil evolvente e ajuste dos pesos

INFORMAÇÕES:

Módulo selecionado: m = 4 mm;

Inspeção do perfil m = 4 mm utilizando 7 pontos coordenados.

1 ←

2 ← **Calcular Erro**

Gráfico 1 (0 a 1):

Gráfico 2 (0 a 1):

Erro (micro m)	0	0	0	0	0	0	0
Pesos	0	0	0	0	0	0	0

Erro (micro m)	0	0	0	0	0	0	0
Pesos	0	0	0	0	0	0	0

3 → **Ajustar Pesos:** ☐ Gráfico 1 ☐ Gráfico 2 **Fechar**

Fonte: Produzida pelo autor

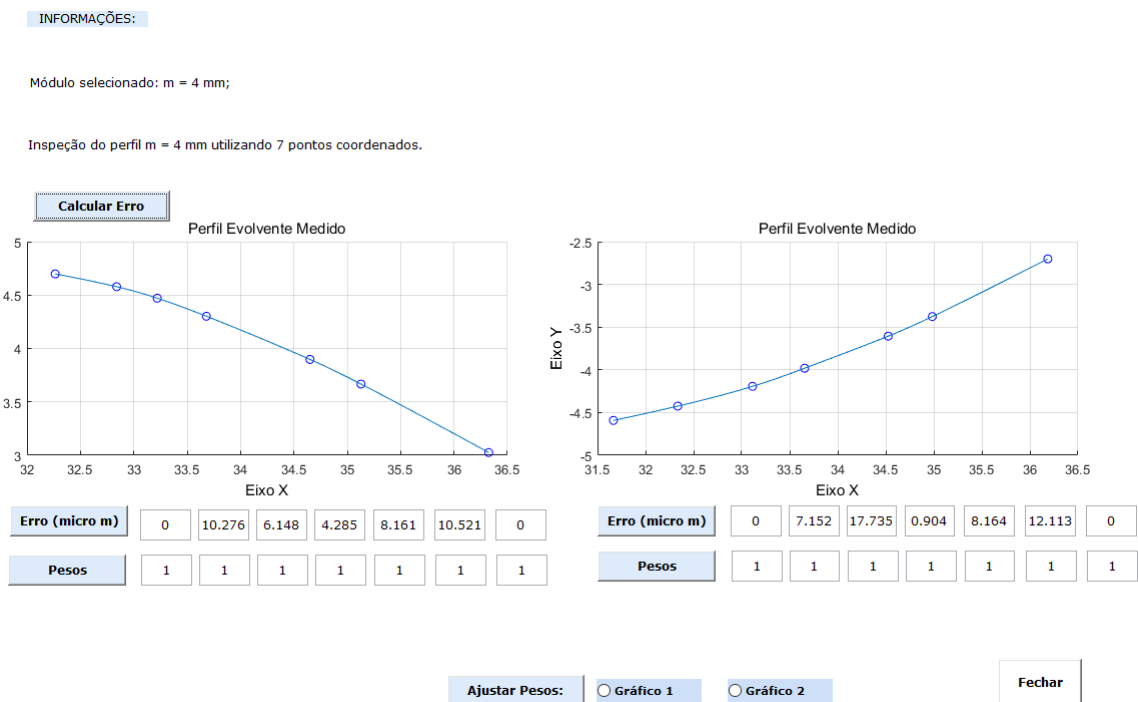
Nesta tela, ações que devem ser tomadas pelo operador, respeitando a ordem da numeração que segue:

1. Verificar nas informações a respeito do módulo selecionado e o número de pontos utilizados;
2. Pressionar o botão Calcular Erro, após este procedimento as informações serão processadas e as respostas desta operação são exibidas nas caixas de texto que constam na tela. Pode-se observar na figura 34, os referidos espaços exibirão os resultados referente ao erro da curva NURBS, em μm , e os valores do parâmetro peso do modelamento matemático;

3. Para erros maiores do que os definidos na programação, ajustes na curva NURBS poderão ser realizados acessando o botão Ajustar Pesos. Anteriormente a esta ação o operador deverá selecionar o arquivo a ser alterado, Arquivo 1 ou Arquivo 2, que correspondem, respectivamente, aos perfis lateral esquerdo e direito do dente da engrenagem. Esta operação é realizada separadamente, visto que o metrologista, ou operador que realizar as medições, poderá cometer erros na inspeção de apenas um dos dois perfis do dente da engrenagem. (Nóbrega, 2016) desenvolveu essa metodologia visando um tempo reduzido de processamento. Os novos valores de pesos (w_i) calculados serão atualizados nas respectivas caixas de texto.

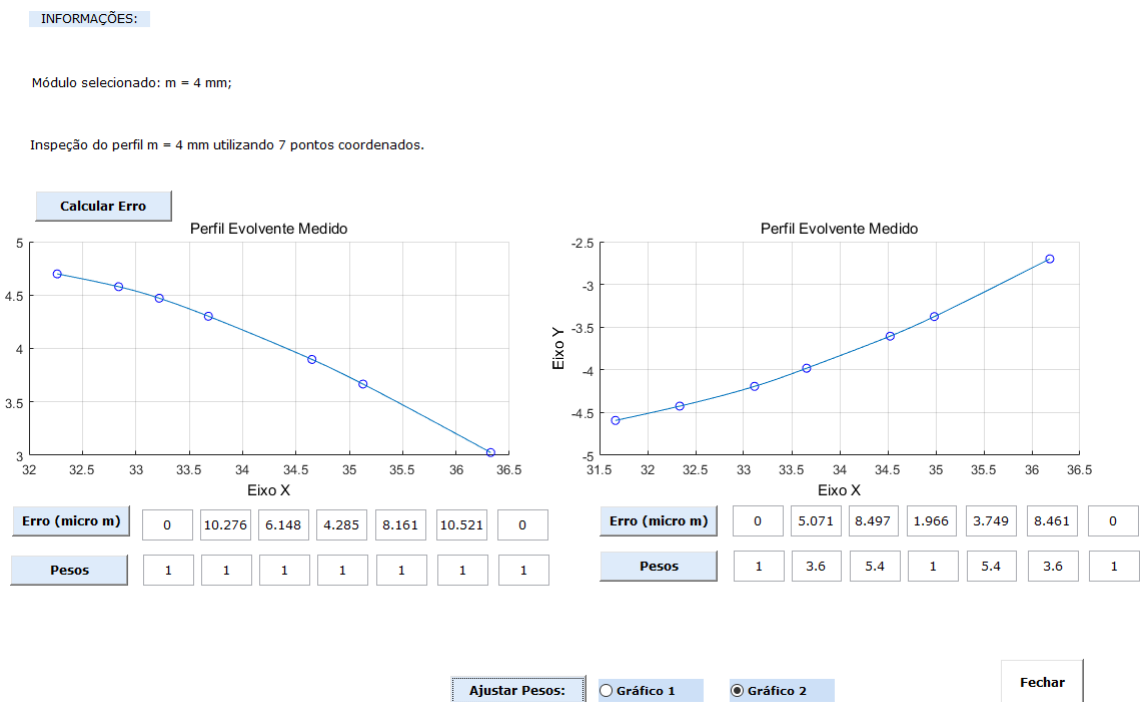
As figuras 35 e 36 ilustram, respectivamente : a tela de interface SIENG – MMC apresentando os resultados de erro da curva NURBS juntamente com os desenhos dos gráficos de perfil dos dois lados, usando a NURBS; e os novos valores de erro após ser realizado os ajustes dos parâmetros pesos w_i .

Figura 35 – Tela da SIENG - MMC ilustrando os resultados dos erros NURBS para engrenagem de módulo 4 mm com 7 pontos coordenados



Fonte: Produzida pelo autor

Figura 36 – Tela da SIENG - MMC ilustrando os resultados dos erros NURBS após a correção do parâmetro peso w_i



Fonte: Produzida pelo autor

Os valores de erros foram definidos por (NÓBREGA, 2016) em sua tese, baseado na ISO 1328, que estabeleceu que o erro máximo permissível da curva NURBS seria igual a $10\mu m$, para engrenagens com módulos variando de 1 à 3,5 mm. Para engrenagens com módulos maiores que 3,5 mm e menores ou igual a 10 mm, com valor de $12\mu m$. Neste trabalho foram analisados módulos de 4 mm e 6 mm.

Pode-se observar nas figuras 35 e 36, que apenas no lado direito do dente houveram erros superiores a $12\mu m$, logo, apenas nesse lado foi realizado os ajustes do parâmetro peso w_i .

4 RESULTADOS

As medições foram realizadas nas engrenagens A e B citadas no Capítulo 3, de módulos 4 mm e 6 mm, nos dentes marcados como 1 e 3 e ângulo de pressão (ϕ) 20°, como ilustrado na figura 23 e na tabela 5.

Vale ressaltar que foram realizadas 2 medições no dente 1 da engrenagem A. Na primeira foram coletados 5 pontos coordenados sobre a superfície de cada um dos lados (esquerdo e direito), na região do perfil evolvente, totalizando 10 pontos, e na segunda foram coletados 7 pontos coordenados de cada um dos lados, totalizando 14 pontos.

Para a engrenagem B, foram realizadas 3 medições no dente 3, variando o número de pontos coletados, sendo respectivamente medições com 8, 9 e 10 pontos coordenados sobre a superfície de cada um dos lados, na região do perfil evolvente, totalizando 16, 18 e 20 pontos coordenados respectivamente.

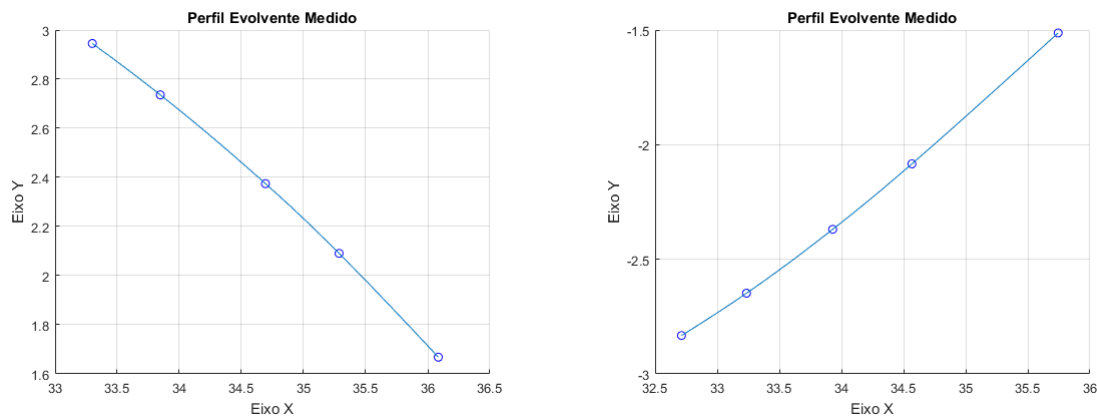
Inicialmente foi inspecionada a engrenagem de módulo 4 mm, com os valores das coordenadas dos pontos coletados, utilizando o sistema computacional SIENG – MMC, foi gerada a curva NURBS para obtenção dos valores de erros relacionados a primeira medição.

A curva e os pontos de controle são mostrados na figura 37. A tabela 6 ilustra os valores dos erros, com e sem o ajuste dos pesos w_i , dos pontos relacionados aos lados esquerdo e direito do dente.

Em seguida foi inspecionado novamente o dente 1 da engrenagem A, agora fazendo aquisição de 7 pontos coordenados para cada lado. A curva e os pontos de controle são mostrados na figura 38. A tabela 7 ilustra os valores dos erros, com e sem o ajuste dos pesos w_i , dos pontos relacionados aos lados esquerdo e direito do dente.

É importante destacar que o erro é definido como a diferença entre o valor da coordenada do ponto medido e o valor da coordenada definida pelo método NURBS. Para engrenagens A e B (4 mm e 6 mm) inspecionadas neste trabalho, o erro máximo estabelecido no sistema computacional é de 12 μm .

Figura 37 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem A, utilizando 5 pontos coordenados.



Fonte: Produzida pelo autor

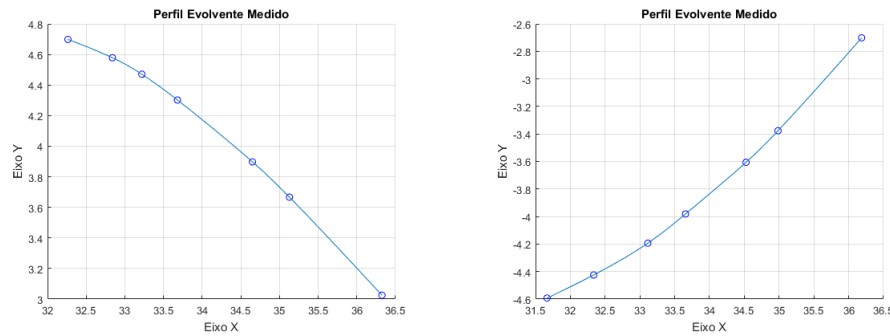
Tabela 6 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem A e 5 pontos coordenados

		Sem ajuste o parâmetro peso w_i				
Lado Esquerdo	Pontos	1	2	3	4	5
	Erros (μm)	0	8,734	7,698	9,344	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1
		Com ajuste do parâmetro peso w_i				
		Não Necessário!				
		Sem ajuste o parâmetro peso w_i				
Lado Direito	Pontos	1	2	3	4	5
	Erros (μm)	0	9,052	5,137	8,939	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1
		Com ajuste do parâmetro peso w_i				
		Não Necessário!				

Fonte: Produzida pelo autor

Por meio dos erros da NURBS registrados na tabela 6 que se referem à engrenagem A, tornou-se possível constatar que para a medição realizada com 5 pontos coordenados, todos os valores calculados foram inferiores ao valor de $12\ \mu m$ estabelecido, sem a necessidade de ajustar os pesos w_i da função. Os maiores erros calculados encontrados para aquela medição foram iguais a $9,344\ \mu m$ e $9,052\ \mu m$, que nesta ordem fazem referência ao ponto 4 do lado esquerdo e ao ponto 2 do lado direito.

Figura 38 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem A, utilizando 7 pontos coordenados



Fonte: Produzida pelo autor

Tabela 7 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem A e 7 pontos coordenados

		Sem ajuste o parâmetro peso w_i						
Lado Esquerdo	Pontos	1	2	3	4	5	6	7
	Erros (μm)	0	10,276	6,148	4,285	8,161	10,521	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1
Não necessário!								
		Sem ajuste o parâmetro peso w_i						
Lado Direito	Pontos	1	2	3	4	5	6	7
	Erros (μm)	0	7,152	17,735	0,904	8,164	12,113	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1
		Com ajuste do parâmetro peso w_i						
	Erros (μm)	0	5,071	8,497	1,966	3,749	8,461	0
	Pesos (w_i)	1	3,6	5,4	1	5,4	3,6	0

Fonte: Produzida pelo autor

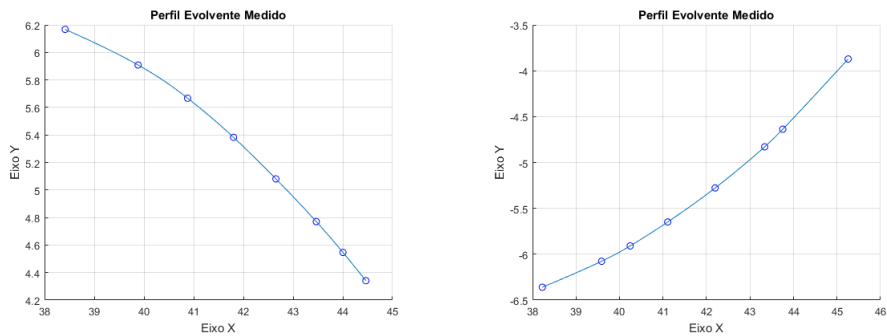
Analisando os resultados registrados na tabela 7, pode-se constatar que para medição da engrenagem A, realizada com 7 pontos coordenados, foram apontados erros superiores ao limite e fez-se necessário utilizar o código para ajustes dos pesos w_i , no qual o caso mais crítico registrado se refere ao ponto 3 do lado direito do dente da engrenagem, com valor de 17,735 μm , a metodologia de alteração de pesos foi aplicada, obtendo o sucesso desejado.

Após realizar a inspeção na engrenagem A, seguiu-se o mesmo roteiro para realizar a inspeção da engrenagem B, realizando 3 medições, variando o número de pontos coletados em cada uma delas. Com os valores das coordenadas dos pontos coletados, utilizando o sistema computacional SIENG – MMC, foi gerada a curva NURBS para obtenção dos valores de erros e correção do parâmetro peso w_i quando necessário.

A primeira medição foi realizada com 8 pontos coordenados de cada lado do dente, em seguida foram realizadas mais duas medições no mesmo dente, agora fazendo aquisição de 9 e 10 pontos coordenados para cada lado, totalizando 16, 18 e 20 pontos coordenados para cada medição, respectivamente. A curva e os pontos de controle são mostrados nas figuras 39, 40 e 41 respectivamente.

As tabelas 8, 9 e 10 ilustram os valores dos erros, com e sem o ajuste dos pesos w_i , dos pontos relacionados aos lados esquerdo e direito do dente.

Figura 39 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem B, utilizando 8 pontos coordenados



Fonte: Produzida pelo autor

Tabela 8 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem B e 8 pontos coordenados

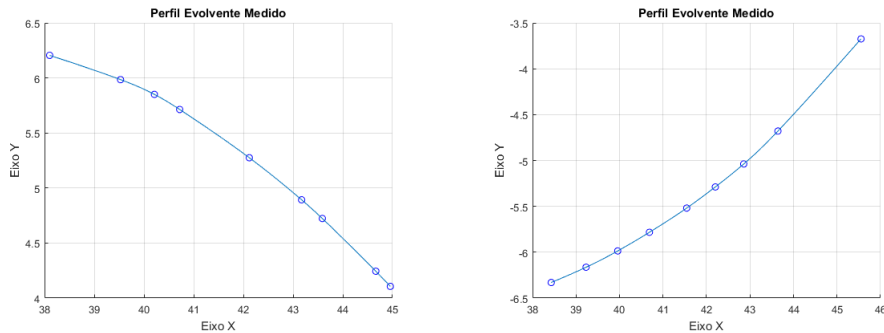
Sem ajuste o parâmetro peso w_i									
Lado Esquerdo	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8
	Erros (μm)	0	24,116	10,371	6,582	2,488	5,492	3,281	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i								
Lado Esquerdo	Erros (μm)	0	9,813	8,314	9,405	3,646	4,399	1,252	0
	Pesos (w_i)	1	6,2	3,2	1	1	3,2	6,2	1
	Sem ajuste o parâmetro peso w_i								
Lado Direito	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8
	Erros (μm)	0	13,516	5,119	4,881	10,893	7,647	10,075	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i								
Lado Direito	Erros (μm)	0	5,298	6,923	4,883	10,893	9,83	3,992	0
	Pesos (w_i)	1	3,6	1	1	1	1	3,6	1

Fonte: Produzida pelo autor

Para os valores expostos na tabela8, torna-se possível perceber que para a medição da engrenagem B, realizada com 8 pontos coordenados, existiram valores de erros que, ainda sem o

ajuste do parâmetro peso w_i , excederam o limite definido, tanto do lado esquerdo quanto do lado direito do dente. Os casos mais críticos registrados se referem aos pontos 2 do lado esquerdo da engrenagem com o valor de $24,116 \mu m$, e o ponto 2 do lado direito com o valor de $13,516 \mu m$, a metodologia de alteração de pesos foi aplicada, obtendo o sucesso desejado.

Figura 40 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem B, utilizando 9 pontos coordenados



Fonte: Produzida pelo autor

Tabela 9 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem B e 9 pontos coordenados

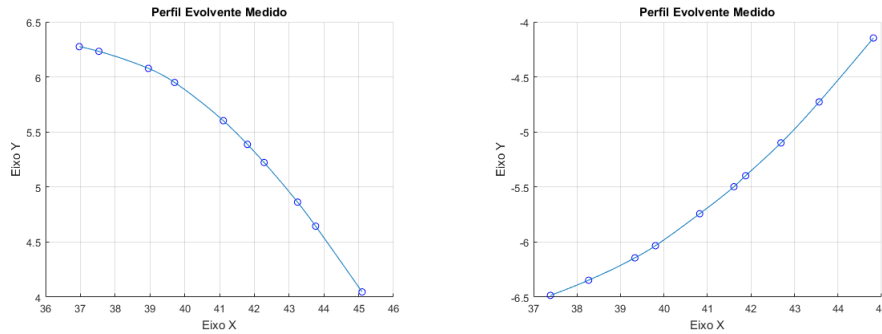
Sem ajuste o parâmetro peso w_i										
Lado Esquerdo	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Erros (μm)	0	10,425	9,998	2,683	13,035	2,821	5,32	3,853	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i									
Lado Direito	Erros (μm)	0	10,425	10,086	4,772	3,842	4,86	5,658	3,853	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	4,6	1	1	1	1
	Sem ajuste o parâmetro peso w_i									
	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lado Esquerdo	Erros (μm)	0	8,26	4,837	2,508	6,786	0,996	9,347	22,042	0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i									
	Erros (μm)	0	3,342	3,761	3,622	6,786	1,472	7,147	9,509	0
Lado Direito	Pesos (w_i)	1	6,4	3,4	1	1	1	3,4	6,4	1

Fonte: Produzida pelo autor

Analisando os valores expostos na tabela 9, pode-se perceber que para medição da engrenagem B, realizada com 9 pontos coordenados, existiram valores de erros que, ainda sem o ajuste do parâmetro peso w_i , excederam o limite definido, tanto do lado esquerdo quanto do lado direito do dente. Os casos mais críticos registrados se referem aos pontos 5 do lado esquerdo da

engrenagem com o valor de $13,035 \mu m$, e o ponto 8 do lado direito com o valor de $22,042 \mu m$, a metodologia de alteração de pesos foi aplicada, obtendo o sucesso desejado.

Figura 41 – Curva NURBS e pontos de controle referente à engrenagem B, utilizando 10 pontos coordenados



Fonte: Produzida pelo autor

Tabela 10 – Erros NURBS do perfil evolvente: engrenagem B e 10 pontos coordenados

Sem ajuste o parâmetro peso w_i										
Lado Esq.	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9 10
	Erros (μm)	0	8,218	13,081	12,821	12,503	0,786	3,409	7,22	5,221 0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i									
Lado Esq.	Erros (μm)	0	8,267	9,219	11,357	13,769	0,867	3,024	5,381	4,908 0
	Pesos (w_i)	1	3,7	13	13,6	10	10	13,6	13	3,7 1
	Sem ajuste o parâmetro peso w_i									
Lado Dir.	Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9 10
	Erros (μm)	0	10,399	4,31	6,712	2,02	8,085	5,448	13,824	9,552 0
	Pesos (w_i)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Com ajuste do parâmetro peso w_i									
Lado Dir.	Erros (μm)	0	6,665	3,028	9,523	2,02	8,094	7,158	8,874	5,642 0
	Pesos (w_i)	1	3,7	3,4	1	1	1	1	3,4	3,7 1

Fonte: Produzida pelo autor

Para os valores expostos na tabela 10, torna-se possível perceber que para medição da engrenagem B, realizada com 10 pontos coordenados, existiram valores de erros que, ainda sem o ajuste do parâmetro peso w_i , excederam o limite definido, tanto do lado esquerdo quanto do lado direito do dente. Destaca-se o lado esquerdo por existirem 3 pontos que excederam o limite, sendo estes os pontos 3, 4 e 5 com seus valores sendo $13,082 \mu m$, $12,821 \mu m$ e $12,503 \mu m$, respectivamente. Do lado esquerdo apenas um ponto excedeu o limite, sendo este o ponto 8 com o valor de $13,824 \mu m$.

Pode-se perceber que a metodologia de alteração dos pesos foi aplicada, mas não obteve o sucesso desejado no lado esquerdo, pois não foi possível o ajuste dos pesos para que o erro ficasse abaixo do valor estabelecido em todos os pontos, ainda assim, percebe-se que dos três pontos que haviam ultrapassado o limite, dois foram ajustados corretamente. Do lado direito a metodologia foi aplicada, obtendo o sucesso desejado.

Afirma Nóbrega (2016), que os valores de erros iguais a 0 (zero) do primeiro e último ponto referentes as tabelas apresentadas neta seção, são justificadas pela distribuição dos valores do vetor paramétrico de nós, sendo este responsável por gerar as funções B-Splines. O vetor paramétrico tem grande influência no processo de aproximação das curvas e, dependendo de sua estrutura, pode-se obter as curvas semi-fechadas ou fechadas. Neste trabalho foram usadas as curvas semi-fechadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma estratégia de medição para inspeção do perfil evolvente, determinação do erro e alteração do parâmetro peso (w_i), baseada no modelo matemático NURBS, de engrenagens cilíndricas de dentes retos, utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) CNC com contato, utilizando apalpador do tipo touch-trigger por medição ponto a ponto. Este equipamento foi responsável pela coleta de pontos coordenados distribuídos sobre a superfície dos dentes das engrenagens utilizadas.

O estudo proposto permite verificar algumas desvantagens e limitações da técnica de medição para inspeção do perfil evolvente aplicada neste trabalho.

Para uma análise prática e mais rápidas dos dados coletados, adaptou-se a interface gráfica chamada SIENG – MMC, que permitiu uma boa interação com o operador e melhor visualização dos dados.

Para a estratégia desenvolvida no capítulo 3, em ambiente de simulação computacional, foram estabelecidos valores de erros máximos permissíveis da curva NURBS, definidos para os perfis evolventes analisados. Neste sentido, para os pontos coordenados que excederam os erros definidos, a metodologia de alteração automática dos pesos w_i foi aplicada gerando resultados satisfatórios. Em apenas um dos casos analisados a metodologia não corrigiu por completo os erros.

Para os perfis evolventes analisados, foi possível constatar que os erros se devem em sua grande parte, ao fato da impossibilidade da captura de forma precisa e equidistante dos pontos, pois não é possível a operação do *joystick* de forma perfeita.

Através deste trabalho foi possível cumprir os objetivos especificados no capítulo 1, servindo também como fonte de inspiração e impulso para próximos trabalhos relacionados a este tema. As sugestões para trabalhos futuros encontram-se no próximo capítulo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Desenvolver estratégia de medição para inspeção do perfil evolvente, determinação do erro e alteração do parâmetro peso (w_i) utilizando o sensor sem contato;
2. Aplicar a metodologia desenvolvida para outros tipos de engrenagens tais como: cônicas e hiperbólicas;
3. Desenvolver uma estratégia para determinação do erro a partir do contorno, utilizando o apalpador touch-trigger.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A. S. e A. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. [S.l.]: Editora Manole. 1ª Edição, 2008.
- ALBUQUERQUE, L. A. *Alinhamento de Imagens de Profundidade na Reconstrução 3D de Objetos de Formas Livres*. Dissertação (Mestrado) — UNB, 2006.
- AQUINO, D. M. G.; CARVALHO, J. C. M. Malhagem de superfícies tridimensionais utilizando-se de nurbs e b-splines. In: *XII Seminário de Iniciação Científica*. UFU: [s.n.], 2003.
- ARENHART, F. A. *Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro*. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) — UFSC, Florianópolis, 2007.
- BOSCH, J. A. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. [S.l.]: New York: Marcel Dekker, 1995.
- FLORES, J. G. e P. *Cinemática e Dinâmica de Engrenagens*. [S.l.]: Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2014.
- GASPARIN, A. L. *Comportamento Mecânico de Polímero Termoplástico para Aplicação em Engrenagem Automotiva*. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, 2004.
- HONG, D. *Effects of Weights in NURBS*. [S.l.]: Department of Mechanical Engineering, State University of New York at Stony Brook., 2016.
- KODA, F. *Estudo da Fadiga de Contato em Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Março 2009.
- Lima Jr, J. C. de. *Determinação de planeza de superfícies metrológicas assistida por computador*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2003.
- Lima Jr, J. C. de. *Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Determinar Parâmetros de Geometrias Substitutas em MMCs*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 2007.
- LIRA, F. de. *Metrologia dimensional - técnicas de medição e instrumentos para controle e fabricação industrial*. Érica, 2015. OKOH, Daniel, *Computer Neural Networks on Matlab*. Anyigba, Nigeria, 2016.
- MINNETO, C. F. *Um Estudo sobre Curvas NURBS*. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, 2003.
- NÓBREGA, L. H. M. S. *Projeto e Desenvolvimento de um Apalpador Touch Trigger de Baixo Custo para Medição por Coordenadas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2011.
- NÓBREGA, L. H. M. S. *Desenvolvimento de uma estratégia de medição, baseada em nurbs, para determinação do desvio total de perfil de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando MMCs*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- NORONHA, J. L. *Aplicação de Máquinas de Medir por Coordenadas na Calibração de Medidas Materializadas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

OLIVEIRA, A. L.; SOUZA, A. R. Validação de processos de medição por coordenadas em processos de controle de qualidade. *Congresso Brasileiro de Metrologia*, Recife, Pernambuco, Brasil, 2003.

PINHEIRO, T. E. B. *Determinação de geometrias substitutas utilizando redes neurais artificiais para análise de medidas obtidas em máquinas de medição por coordenadas*. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

PIZO, G. A. I. *Sistema Computacional para Tratamento de Nuvens de Pontos e Reconstrução Tridimensional de Superfícies Baseado em Modelos Deformáveis*. Dissertação (Mestrado) — UnB, Faculdade Tecnológica, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

PORATH, M. C. *A tecnologia de medição por coordenadas no clico de desenvolvimento de produtos plásticos*. [S.l.]: IX ENEGEP, 2002.

ROLIM, T. T. *Sistemática Indicadora de Método para Calibração de Máquina de Medição por Coordenadas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 2003.

SILVA, E. C. M. da. *Aplicação de NURBS em MMCs, com apalpador touch trigger, para escaneamento de superfícies de formas livres e geometrias complexas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Março 2011.

Soares Jr, L. *Sistemática para garantia da qualidade na medição de peças com geometria complexa e superfície com forma livre utilizando máquina de medição por coordenadas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Dezembro 2010.

VICENTE, M. A. F. *Estimação dos Erros de uma Máquina Estacionária de Medição de Coordenadas*. [S.l.]: Coimbra, 1977.

WECKENMANN, A. et al. Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology. *Precision Engineering*, 17: 244-252, 1995.

ZHANG, P. *NURBS Toolbox*. [S.l.]: Site MathWorks, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ROTINA UTILIZADA NO MATLAB

```

clear all

close all

clc

% Import the data

[file,path] = uigetfile('*.xls'); % faz aparecer o elemento de interface gráfica para escolher
o arquivo, o caminho do arquivo será armazenado em 'path' e o nome em 'name'.

[ , , tab] = xlsread(fullfile(path, file),file); % Abre o arquivo através do metodo raw e
salva os valores em tab.

lvalue = size(tab,1) - 5; % pega o numero da linha do ultimo valor da tab

fvalue= lvalue; % defini o numero da primeira linha igual o ultimo, antes de começar a
percorrer

value = '1'; % valor que será procurado na coluna ref (16) em tab.

% O while abaixo serve para encontrar a primeira linha (onde tem o ponto 1A no arquivo
xls) em tab, vai percorrer a coluna ref (16) de baixo pra cima enquanto o valor for 1, pulando de
duas em duas posições, pois é assim que esta definido no arquivo xls e em tab.

while value == '1'

    ref = strcmp('1',tab(fvalue,16)); % strcmp serve para comparar duas strings.

    if ref == 1

        fvalue = fvalue - 2;

    else

        fvalue = fvalue + 2;

        value = '0'; % Se o valor em ref não for 1, então value passa a valer 0 e sai do while,
fvalue tambem ganha + 2, pois seria o último valido.

    end

end

nvalues = fvalue; %nvalues serve apenas para contagem do while abaixo.

countvalue = 1; % variavel que vai servir para contar e armazenar o numero total de
linhas.

% abaixo é iniciada a contagem e o total sera armazenado em countvalue

while nvalues < lvalue

```

```
countvalue = countvalue + 1;
nvalues = nvalues + 2;
end
% construção de raw
raw = cell(countvalue,4); % countvalue é o numero de linhas e 4 é o numero de colunas
% o for abaixo será responsável por preencher o raw com valores de tab.
rawposition = 1; % inicialização da variável de referência da linha.
for n = 0:2:countvalue * 2 - 2
    raw(rawposition,1) = tab(fvalue + n, 19); % primeira coluna
    raw(rawposition,2) = ''; % segunda coluna
    raw(rawposition,3) = ''; % terceira coluna
    raw(rawposition,4) = tab(fvalue + n, 24); % quarta coluna
    rawposition = rawposition + 1; % será acrescentado 1 em rawposition para preencher a
    % próxima linha se o for for executado novamente.
end
raw(cellfun(@(x) isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw)) = ''; cellVectors =
raw(:,[1,2]);
% conversão das strings em raw para double (fteste e fteste2).
c=str2double(raw)
degree=3;
npts = countvalue / 2;
dteste=c(1:countvalue / 2,1);
etestec=c(1:countvalue / 2,4);
h = countvalue / 2;
f = [];
g = [];
for v = 1:1:h
    f(v) = 0;
    g(v) = 1;
end
```

```

fteste=[dteste';eteste';f;g];
cpnts1 = fteste(1:4, 1:npts)
dteste2=c((countvalue / 2) + 1:countvalue,1);
eteste2=c((countvalue / 2) + 1:countvalue,4);
fteste2=[dteste2';eteste2';f;g];
cpnts2 = fteste2(1:4, 1:npts)
disp('pontos coordenados1')
cpnts1 = fteste(1:4, 1:npts) % selecionando as células que serão utilizadas do arquivo
excel.

% MULTIPLICANDO AS COORDENADAS DOS PONTOS APALPADOS (pi) COM
wi PARA OBTER A FORMA EM COORDENADAS HOMOGÊNEAS.

cpnts1(1,:) = cpnts1(4,:).*cpnts1(1,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos
valores de x (primeira linha).

cpnts1(2,:) = cpnts1(4,:).*cpnts1(2,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos
valores de y (segunda linha).

cpnts1(3,:) = cpnts1(4,:).*cpnts1(3,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos
valores de z (terceira linha).

disp('pontos multiplicados pelo peso')
cpntsRetorno1 = cpnts1(4,:);
%USANDO A FUNÇÃO 'calc_knots' PARA DEFINIR O VETOR DE NÓS
knots = calc_knots(npts,degree)
%USANDO AS FUNÇÕES DO TOOLBOX
curva = nrbbmak(cpnts1, knots);
%disp('closestpoints');
disp('antes de entrar no closestpoints')
cp1 = ClosestPoints(fteste(1:3, 1:npts), curva)
disp('saiu do closestpoints e entrou no erro do editor')
erro1 = (cp1(1,:) - fteste(1,1:npts)) .^ 2;
erro1 = erro1(1,:) + ( (cp1(2,:) - fteste(2,1:npts)) .^ 2 );
erro1 = erro1 (1,:)+ ( (cp1(3,:) - fteste(3,1:npts)) .^ 2 );
erro1 = sqrt(erro1);

```

```
erro1
cp1;
media=mean (erro1);
fteste(1:3, 1:npts);
disp('saiu do erro do editor')
hold on;
disp('saiu do hold on')
figure(1)
plot3( cp1(1,:), cp1(2,:), cp1(3,:), 'bo');
erroRetorno1 = erro1;

%PLOTA OS PONTOS DE CONTROLE E A CURVA GERADA
nrbplot(curva, 100);
grid on
title('Perfil Evolvente Medido')
xlabel('Eixo X')
ylabel('Eixo Y')
disp('pontos coordenados2')
cpnts2 = fteste2(1:4, 1:npts) % selecionando as células que serão utilizadas do arquivo
excel.

% MULTIPLICANDO AS COORDENADAS DOS PONTOS APALPADOS (pi) COM
wi PARA OBTER A FORMA EM COORDENADAS HOMOGÊNEAS.
cpnts2(1,:) = cpnts2(4,:).*cpnts2(1,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos
valores de x (primeira linha).
cpnts2(2,:) = cpnts2(4,:).*cpnts2(2,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos
valores de y (segunda linha).
cpnts2(3,:) = cpnts2(4,:).*cpnts2(3,:); % multiplicando os pesos (wi - quarta linha) pelos
valores de z (terceira linha).
disp('pontos multiplicados pelo peso')
cpntsRetorno2 = cpnts2(4,:);

%USANDO A FUNÇÃO 'calc_knots' PARA DEFINIR O VETOR DE NÓS
knots = calc_knots(npts,degree)
```

%USANDO AS FUNÇÕES DO TOOLBOX

```
curva = nrbmak(cpnts2, knots);  
  
%disp('closestpoints');  
  
disp('antes de entrar no closestpoints')  
cp2 = ClosestPoints(fteste2(1:3, 1:npts), curva)  
disp('saiu do closestpoints e entrou no erro do editor')  
erro2 = (cp2(1,:) - fteste2(1,1:npts)) .^ 2;  
erro2 = erro2(1,:) + ( (cp2(2,:) - fteste2(2,1:npts)) .^ 2 );  
erro2 = erro2 (1,:)+ ( (cp2(3,:) - fteste2(3,1:npts)) .^ 2 );  
erro2 = sqrt(erro2);  
  
erro2  
  
cp2;  
  
media=mean (erro2);  
  
fteste2(1:3, 1:npts);  
  
disp('saiu do erro do editor')  
  
hold on;  
  
disp('saiu do hold on')  
  
figure(2)  
  
hold on;  
  
plot3( cp2(1,:), cp2(2,:), cp2(3,:), 'bo');  
  
erroRetorno2 = erro2;  
  
%PLOTA OS PONTOS DE CONTROLE E A CURVA GERADA  
  
nrbplot(curva, 100);  
  
grid on  
  
title('Perfil Evolvente Medido')  
  
xlabel('Eixo X')  
  
ylabel('Eixo Y')  
  
%hold off;
```